

UNIVERSITE DE GENEVE

FACULTE DE MEDECINE

Section de médecine dentaire

Division de prothèse conjointe et partielle adjointe

Division de technologie des matériaux dentaires

Professeur J.-N. NALLY

Professeur J.-M. MEYER

SOUDABILITE DE QUELQUES ALLIAGES

NICKEL — CHROME

THESE

présentée à la faculté de médecine de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de docteur en médecine dentaire

par

Gilbert BOCHET

de

CARTIGNY (Genève)

Thèse No 351

GENEVE

Editions Médecine et Hygiène

1979

UNIVERSITE DE GENEVE

FACULTE DE MEDECINE

Section de médecine dentaire

Division de prothèse conjointe et partielle adjointe

Professeur J.-N. NALLY

Division de technologie des matériaux dentaires

Professeur J.-M. MEYER

SOUDABILITE DE QUELQUES ALLIAGES

NICKEL – CHROME

THESE

présentée à la faculté de médecine de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de docteur en médecine dentaire

par

Gilbert BOCHET

de

CARTIGNY (Genève)

Thèse No 351

GENEVE

Editions Médecine et Hygiène

1979

La faculté de médecine, sur le préavis des professeurs J.-N. Nally et J.-M. Meyer, autorise l'impression de la présente thèse, sans prétendre par là émettre d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 26 mars 1979

Le doyen :
André Cruchaud

Thèse No 351



Nous désirons exprimer aux professeurs J.-N. Nally et J.-M. Meyer notre profonde gratitude pour l'intérêt constant qu'ils nous ont témoigné durant l'accomplissement de ce travail, et pour leur aide précieuse.

Nous tenons également à remercier pour leur accueil et leur précieuse collaboration :

- Mademoiselle C. Robert, laborantine.
- Madame U. Blet, laborantine.
- Madame J. Evalet, secrétaire.
- Monsieur R. Barraud, ingénieur.
- Monsieur A. Fleury, technicien-dentiste.
- Monsieur E. Steinhauer, de l'Institut des métaux et des machines, section de métallurgie mécanique et des soudures, école polytechnique fédérale de Lausanne.
- Toutes les personnes qui nous ont aidé d'une façon ou d'une autre.

A MES PARENTS

A MON FRERE

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	1
1.1. Aperçu des problèmes soulevés	1
1.2. But de la recherche	3
2. Revue de la littérature	4
2.1. Soudure autogène	5
2.2. Soudure dentaire ou brasure	6
2.3. Les matériaux	7
2.3.1. Le métal d'apport	7
2.3.2. Le flux	9
2.3.3. Les revêtements	12
2.3.4. L'épaisseur de la soudure	13
2.3.5. La technique	17
3. Partie expérimentale	20
3.1. Méthode de travail	20
3.1.1. Réalisation des échantillons	20
3.1.2. Mise en revêtement	25
3.1.3. Opération de soudage	27
3.1.4. Matériaux testés	28
3.1.5. Essais de traction	29
3.1.6. Macrophotographies	29
3.2. Etude par l'essai de rupture du joint soudé	30
3.2.1. Techniques de chauffage	30
3.2.2. Alliages d'apport	30
3.2.3. Flux	32
3.2.4. Epaisseur du joint	33
3.2.5. Alliages de base	33
3.2.6. Statistiques	33
4. Résultats	35
5. Analyse des résultats	38
5.1. Résistance à la rupture de différentes soudures	38
5.2. Influence de l'épaisseur du joint	41
5.3. Influence de l'alliage	45
5.4. Influence de la vitesse de chauffage	46
5.5. Implications pratiques	48

6. Conclusion	51
6.1. Le meilleur résultat : une technique simple	51
6.2. Soudage secondaire	52
6.3. Avenir du soudage des alliages nickel-chrome pour l'usage dentaire	52
6.3.1. La corrosion galvanique	53
6.3.2. La corrosion chimique	53
Bibliographie	54

1. Introduction

1.1. Aperçu des problèmes soulevés

La soudabilité des alliages, dentaires ou pas, à base de métaux précieux tels que l'or ou l'argent, a été établie depuis longtemps.

Empirique au début, le soudage est devenu, petit à petit, une science. On a compris la physique de l'adhérence et reconnu que toute la technique de soudage, développée depuis des siècles, avait pour principal but d'assurer la mouillabilité la plus facile du métal de base, qui compose les pièces à assembler, par le métal d'apport ou soudure. Les flux, par exemple, qui empêchent l'oxydation du métal de base, ont pu être adaptés, par leur composition chimique, à un type d'alliage particulier et à la température de soudage. Des soudures de précision peuvent être faites, car on a défini la distance idéale des objets à souder, pour que le phénomène de capillarité permette l'invasion du joint par le métal d'apport et pour que la contraction de prise et de refroidissement du métal d'apport puisse être compensée par l'expansion thermique, mesurée, du revêtement reliant les éléments à souder. On a compris comment utiliser de manière efficace les sources de chaleur classiques et on en a développé de nouvelles, associées à des techniques particulières.

Lorsqu'un type nouveau d'alliage apparaît, une étude de sa métallographie permet, au vu de nos connaissances, de développer sa métallurgie de soudage. Deux types d'alliages relativement récents, les alliages à base d'aluminium et les alliages inoxydables contenant du chrome, qui intéressent particulièrement l'art dentaire, ont présenté à peu près les mêmes difficultés. Tous deux, en effet, ne sont inoxydables que parce que leur surface est "passivée", recouverte qu'elle est d'une fine couche d'oxyde, d'aluminium ou de chrome, couche qui ne s'accroît pas une fois formée mais qui se forme spontanément très rapidement au contact de l'air et qui se répare d'elle-même si elle est endommagée. Les alliages précieux sont fondamentalement différents, inoxydables qu'ils sont dans la masse et ne se recouvrant donc pas d'oxydes à température normale.

Comment souder les alliages de base passivés ? Il faut pouvoir les débarrasser de leur couche d'oxyde, car elle a une basse énergie de surface et ne peut donc pas être mouillée par la soudure. Dans des domaines industriels particulier, comme l'aviation, des techniques très complexes et très onéreuses permettant le brasage de haute qualité d'alliages contenant du chrome, du nickel, du fer et du cobalt, ont été mises au point depuis une vingtaine d'années. Mais ces techniques sont-elles utilisables en médecine dentaire ? On peut se demander également si l'adaptation d'une technique simple, déjà couramment utilisée en laboratoire dentaire, ne pourrait pas donner, avec les alliages passivés, des résultats suffisants et suffisamment reproductibles pour convenir aux exigences mécaniques des joints par soudure d'éléments de prothèse conjointe.

Il est possible que, pour plusieurs raisons, les superalliages à base de nickel et de chrome, remplacent un jour en prothèse conjointe, les alliages à base d'or. Citons en deux :

- Leur prix beaucoup plus bas que celui des alliages d'or, est moins susceptible de varier et surtout d'augmenter.
- Leurs propriétés mécaniques et physiques, comme par exemple leur module d'élasticité élevé ainsi que leur faible densité, les avantagent par rapport aux alliages précieux.

Le fait que ces alliages n'aient pas encore un grand succès est dû, en plus des difficultés rencontrées pour leur soudage, aux problèmes posés lors de leur coulée, qui doit se faire à très haute température, c'est-à-dire à environ 1380° C. Le moyen le plus simple pour cette coulée est d'utiliser le chalumeau oxy-acétylénique pour la chauffe, mais il est très difficile de déterminer le moment où l'alliage atteint sa température de coulée.

En effet, plusieurs types d'alliages nickel - chrome, le Wiron S et le Victory par exemple, ne se liquéfient pas complètement et se tassent seulement un peu, restant à l'état pâteux. Il faut alors une grande expérience et une grande pratique de ces alliages pour éviter la surchauffe, qui apparaît très vite avec l'oxygène-acétylène et élimine par évaporation les composants les plus volatils de l'alliage, altérant ainsi les propriétés mécaniques. Des gaz sont également dissous par l'alliage, ce qui explique les porosités. Les frondes à induction sont théoriquement idéales pour couler les alliages nickel - chrome, mais restent pour l'instant onéreuses et d'un maniement délicat.

Il faut aussi très soigneusement choisir le revêtement, qui doit être chimiquement compatible avec les alliages nickel-chrome à haute température. Les alliages nickel-chrome ont pratiquement le même coefficient de dilatation que les ors, mais comme leur liquidus est plus élevé d'environ 450°C , la quantité totale de contraction de prise et de refroidissement, après coulée, est plus grande et le revêtement doit pouvoir la compenser. Il faut s'assurer d'une fidélité dimensionnelle maximale, car l'ajustage et la finition de la pièce coulée sont rendus difficiles par la grande dureté et la faible ductilité des alliages nickel-chrome. La résistance au ternissement et à la corrosion, ainsi que la liaison céramo-métallique, inspirent aussi beaucoup de méfiance aux praticiens envers les alliages nickel-chrome, même si ces problèmes sont maintenant en bonne voie d'être maîtrisés.

1.2. But de la recherche

La difficulté rencontrée lors du soudage de pièces en alliage nickel-chrome est souvent avancée comme une contre-indication de ces alliages en prothèse scellée, et il nous semble nécessaire de vérifier si cette contre-indication existe.

Si ce n'est pas le cas, nous nous efforcerons de trouver la meilleure méthode pour souder de tels alliages, avec des résultats reproductibles et avec des équipements et des matériaux, si possible, couramment rencontrés dans les laboratoires dentaires.

Par ce travail, nous désirons franchir une nouvelle étape dans l'acquisition de la technique d'utilisation des alliages nickel-chrome satisfaisant aux exigences de la prothèse conjointe.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Lorsque l'homme commença à maîtriser le travail des métaux et des alliages de métaux, il trouva très vite le moyen d'unir entre elles par soudage des pièces métalliques.

Les Etrusques, 1000 ans avant J-C., connaissaient des techniques très sophistiquées pour le soudage de l'or et leur technique dite "des granules" permettant de souder, sans les noyer, plus de cent granules d'or de 0,3 mm de diamètre sur une surface de 15 mm de diamètre, démontre leur haute notion de la physique d'un brûleur et de l'abaissement de l'intervalle de fusion par appauvrissement de l'alliage, même si ces notions restent très empiriques. Décrite pourtant par Pliny l'Ancien, de manière peu évidente il est vrai, la recette de cette technique s'est perdue durant le Moyen Age, et ne fut retrouvée que de nos jours. (34)

Au quatrième siècle après J-C, les armes blanches en acier forgé avaient fini de surclasser les armes romaines en airain. Le procédé de forgeage d'une lame, en martelant un lingot d'acier doux, puis en repliant la feuille obtenue, et en répétant cette opération, consiste à souder les feuillets successifs entre eux par martelage à chaud, c'est-à-dire par forgeage.

L'étude archéologique de tombes burgondes a permis la découverte d'épées courtes typiques de cette époque sur lesquelles la rouille, se propageant au niveau des soudures entre les feuillets, mettait parfaitement en évidence la texture due à un tel travail de forgeage. Là encore, ces travaux de soudage étaient empiriques, et on ne parlait pas de dosage du carbone. Mais on savait déjà l'influence d'un séjour prolongé d'une pièce de fer ou d'acier doux dans un feu de charbon de bois.

De nos jours, la science a remplacé l'empirisme et le soudage, artisanal ou industriel, est sûr et facile pour nombre de métaux et d'alliages d'usage courant.

Par soudage, on peut obtenir des joints de quatre types :

1. Soudure autogène, où les deux pièces métalliques se lient par coalescence, sans apport de métal, ou avec un métal d'apport identique au métal de base.
2. Soudure par solution, où un alliage intermédiaire se forme.
3. Soudure par mouillage, soit par adsorption, soit par diffusion.
4. Soudure par dépôt électrochimique (4).

2.1. Soudure autogène

Pour mémoire, citons les progrès réalisés dans le domaine de la soudure autogène, où, après avoir utilisé l'oxygène-acétylène, en même temps source de chaleur et atmosphère de protection, puis l'arc électrique, avec un flux ou un milieu de gaz inerte, on en arrive au faisceau d'électrons et au laser, en général sous vide poussé. Ces techniques fines de soudure autogène, de par le matériel requis, sont malheureusement chères surtout dans un contexte artisanal comme un laboratoire dentaire, par exemple (13).

La technique Microplasma paraît être l'une des plus souples. Le plasma, c'est-à-dire le milieu gazeux ionisé par la haute température et engendré par l'arc électrique, quitte l'électrode de tungstène poussé par le flux gazeux, et forme une sorte de dard comparable à celui d'un chalumeau. La protection contre l'oxydation offerte par le gaz est pratiquement totale et l'apport d'énergie peut être défini par un réglage de l'intensité du courant, sans faire varier la longueur du dard. On peut aussi régler la longueur du dard en faisant varier l'apport d'argon et d'hydrogène. Mais les réglages sont très délicats et, si cet appareil convient particulièrement bien pour réunir des tôles ou des fils bout à bout, grâce à la haute température de l'arc électrique, sans pour autant chauffer la masse des pièces, il est par contre moins bien adapté pour réunir des pièces façonnées, à épaisseur variable, par des joints d'épaisseur également variable et atteignant 2 mm et plus (30).

2.2. Soudure dentaire et brasure

La soudure dentaire, aussi appelée soudure forte, fait partie des soudures par mouillage (3e type). Elle correspond à ce que l'industrie appelle brasure. Elle consiste à faire couler, par pesanteur ou capillarité, un alliage en fusion, le métal d'apport, entre et autour des deux pièces à souder, composées de métal de base et qui, si elles sont chauffées pour pouvoir être mouillées, ne sont toutefois pas en fusion. Le métal d'apport, qui ne contient en principe pas de fer (nous verrons qu'il y a des exceptions) doit être chauffé jusqu'à la température de son liquidus, le point le plus haut de l'intervalle de fusion, c'est-à-dire la température où l'alliage est entièrement en fusion. Le liquidus du métal de base est forcément supérieur à celui du métal d'apport et ceci de 50 à 100° C. Après refroidissement le métal d'apport adhère aux pièces à souder et les réunit (1,25,29). Le métal d'apport peut aussi être un alliage que l'on coule contre une pièce déjà existante et qui s'y fixe (coulée de raccord) (14, 26).

On peut citer comme exemple une glissière, déjà façonnée en métal, qui doit faire corps avec un élément de prothèse conjointe. Lors du modelage de ce dernier, en cire, on met en place la glissière qui est prise dans le revêtement avec la cire. Au moment de la coulée à la cire perdue, l'alliage en fusion vient en contact avec l'élément rétentif de la glissière et se soude à elle. Comme il est impossible, dans ce cas, d'utiliser un flux, il faut compter sur le pouvoir réducteur du revêtement.

La brasure, donc la soudure dentaire, tire l'essentiel de sa résistance mécanique de la possibilité du métal d'apport de mouiller le métal de base (1, 6, 31). L'énergie de surface, qui a permis à la soudure en fusion de se répandre sur le métal de base, est également l'énergie du lien, lorsque le métal d'apport est solidifié. S'il y a une grande différence entre les liquidus du métal de base et du métal d'apport, le joint ne sera pratiquement dû qu'à la mouillabilité, car il ne se forme que peu ou pas d'alliage intermédiaire. Un bon joint est créé, par adhérence, grâce au proche contact des atomes des deux métaux. On dit qu'il y a accrochage. Si la différence des liquidus des deux alliages est faible, il se forme un alliage au niveau du joint et, par solution, il y a interdiffusion des atomes des deux métaux.

Une diffusion très marquée est-elle souhaitable ? En théorie pure, la diffusion doit permettre la création d'un joint plus résistant mécaniquement, mais d'inévitables inconvénients l'accompagnent. Comme des températures relativement hautes, pendant un temps relativement long, sont nécessaires pour obtenir la diffusion des atomes, des phénomènes d'évaporation et d'oxydation apparaissent, causes de piqûres au joint et de microporosités. En plus, si les pièces à souder sont forgées ou étirées, les hautes températures prolongées, en provoquant une recristallisation, détruisent la structure étirée, altérant la résistance des pièces elles-mêmes. Ce n'est donc pas la diffusion, mais ce sont les effets secondaires des hautes températures qui nuisent à la soudure. (10)

Pour devenir une science, la soudure dentaire et la brasure industrielle ont été étudiées en détail, aussi bien au point de vue des matériaux qu'à celui des techniques et instrumentations.

2.3. Les matériaux

Pour une soudure dentaire, on utilise de nombreux matériaux, de toutes natures :

2.3.1. Le métal d'apport

Ses qualités doivent être les suivantes :

- Il doit couler facilement et pour cela, son intervalle de fusion doit être très petit.
- En fusion, il doit couler librement, être donc assez fluide (basse tension superficielle).
- Il doit mouiller le métal de base.
- Il doit être résistant à la corrosion et au ternissement.
- Il doit être assez stable, pour qu'en fusion, les éléments à bas point de fusion ne s'évaporent pas rapidement causant des porosités et des piqûres.
- Sa couleur doit s'adapter à celle du métal de base.
- Sa résistance et sa dureté doivent être maximum (25, 29).

On se rend compte que le métal d'apport doit présenter des caractéristiques assez proches de celles des alliages dentaires à couler.

Sa composition s'en approche donc forcément. Les soudures à base d'or ont un titre de 45 à 80 %. L'or protège de la corrosion mais plus le titre est élevé, moins la soudure a de facilité à couler. Les soudures de titre élevé sont indiquées pour ajouter un point de contact, par exemple, mais il faut préférer des soudures de titre plus bas (0,450 à 0,650) pour réunir deux pièces. Les soudures modernes à bas titres résistent bien à la corrosion et n'ont pas de sérieuse tendance à ternir en bouche. Une soudure d'un titre donné a, à peu près, la même dureté qu'un alliage à couler du même titre, mais les composants spécifiques aux soudures abaissent son pourcentage d'allongement. A titre égal, une soudure est donc plus cassante qu'un alliage à couler (25).

L'argent remplace l'or dans les soudures industrielles et dans certaines soudures dentaires, pour les attelles provisoires, par exemple. Pour être utilisable en bouche sans se corroder, le titre d'argent de cette soudure doit être au moins de 60%. L'argent forme avec le cuivre un alliage eutectique fondant à 780°C (liquidus et solidus confondus). Cet alliage contient 72% d'Ag. et 28% de Cu. Un eutectique est entièrement liquide à une température plus basse que le liquidus de tout autre mélange des deux métaux qui le composent, et plus basse que la température de fusion des métaux purs eux-mêmes. Comme l'eutectique possède un point de fusion et non pas un intervalle de fusion, cet alliage fond d'un coup et indique très clairement le moment où la soudure coule. Les métaux purs utilisés comme métaux d'apport présentent ce même avantage. Pour les soudures de teinte blanche le nickel remplace le cuivre. Les composants spécifiques aux soudures, l'étain, le zinc, le phosphore, le cadmium, influencent la fluidité de l'alliage en fusion et la température de fusion (31, 6).

Les soudures à base de métaux vils contiennent principalement du nickel et du chrome. Lorsqu'elles sont destinées à être utilisées sur des alliages de base contenant du cobalt, elles en contiennent aussi (7). Les principaux additifs sont le bore, le silicium (15), le phosphore, le fer, le manganèse, le molybdène. Le bore et le silicium sont des désoxydants et des fluidifiants. Le bore abaisse la contraction de refroidissement, mais ajouté à plus de 1%, il augmente, par trop, l'intervalle en fusion en abaissant le solidus. Le silicium peut être ajouté jusqu'à 5%. Il abaisse le liquidus, sans presque agir sur le solidus, réduisant l'intervalle de fusion (15). Lorsqu'une bonne résistance, mécanique et à la corrosion,

est demandée à haute température, on ajoute du tungstène, ainsi que du niobium et du titane. L'alliage doit être très stable à la température ambiante également. (7)

Il faut enfin avoir toujours à l'esprit qu'un alliage d'apport est modifié par le soudage. Même en quantité minime, une évaporation du zinc et de l'étain, ainsi que la formation de nouveaux alliages au niveau du joint avec l'alliage de base, provoquent une élévation sensible de l'intervalle de fusion de l'alliage d'apport. Cette élévation, loin d'être nuisible, est même souhaitable. (29)

2.3.2. Le flux

Le rôle du flux est de recouvrir, une fois fondu, les surfaces des pièces à souder où se formera le joint. Protégé ainsi de l'oxygène présent dans le milieu ambiant d'un four, ou dans la flamme d'un chalumeau, le métal de base ne s'oxyde pas. En raison de sa plus faible densité, le flux est simplement déplacé par la soudure lorsqu'elle coule dans le joint.

Incapable d'escamoter purement et simplement les oxydes, le flux peut cependant, dans une certaine mesure, mettre en solution ceux qui se seraient formés au début du chauffage, ou les réduire chimiquement. (1)

Il est important que le flux soit adapté à la soudure. Sa viscosité à la température de soudage est déterminante pour la coulée de l'alliage d'apport. Surchauffé, le flux perd de son efficacité. Le flux joue ainsi accessoirement le rôle d'indicateur de température (29).

Il faut faire attention que le flux ne contienne pas d'eau. L'eau, réagissant avec le borax du flux, provoque des soufflures dans le flux en fusion. L'alcool est un excellent moyen pour lier la poudre de flux en une pâte plus facile à appliquer (7, 31).

Pour les soudures fortes à l'or ou à l'argent, utilisées avec des métaux de base comme les métaux précieux, le laiton ou le cuivre, la formule suivante donne de bons résultats :

55 % borax déshydraté, ou verre de borax pilé ($\text{Na}_2 \text{B}_4 \text{O}_7$).

35 % acide borique ($\text{H}_2 \text{B}_4 \text{O}_7$).

10 % silice (SiO_2) (1).

Lorsque l'on veut souder entre elles des pièces en alliages contenant du chrome (acier inoxydable, nickel-chrome, chrome-cobalt), le flux doit contenir des fluorures qui sont les meilleurs solvants à chaud de l'oxyde de chrome. Au fluorure de potassium (KF), ou au fluorure acide de potassium (KHF_2), on ajoute de la silice (flux acide), ou de la chaux (CaCO_3) (flux basique). Le chrome et le titane s'oxydent très facilement à haute température, formant des scories réfractaires, à très haut point de fusion, qui diminuent fortement la mouillabilité. Le flux n'est que partiellement capable d'empêcher la formation de ces scories et de les dissoudre.

Pour réussir le soudage, la technique a une grande influence.

Il ne faut pas régler "réductrice" la flamme oxy-acétylénique, car la proportion de carbone augmenterait dans les alliages, les rendant cassants par formation de carbures. On règle le chalumeau pour obtenir une flamme neutre et c'est elle qui protège de l'oxydation l'alliage de base.

Aussi, une fois la flamme posée sur les pièces à souder, ne faut-il plus l'en retirer, car l'air oxyderait le métal chaud.

Si l'on soude très vite, on risque moins de modifier la composition de l'alliage de base, ce qui est très important pour les nickel-chrome.

Ces derniers ont en effet une structure austénitique, tel l'acier inoxydable 18/8 (18% de chrome, 8% de nickel) qui, si on

en modifie la composition en ce qui concerne particulièrement le chrome, le carbone, le molybdène et le titane, se corrodent plus facilement.

A 900°C , un acier contenant du fer et 0,4% de carbone, est une solution solide homogène. Il est cristallisé selon le système cubique à faces centrées et la phase dans son ensemble est appelée austénite, ou phase γ . Lors de son refroidissement, qu'il soit rapide ou lent, apparaissent des phases où la cristallisation est cubique centrée. L'alliage devient magnétique et peut être durci par un refroidissement brusque, à cause des efforts internes entre les 2 sortes de cristallisation.

Allié à 18% de chrome et au minimum à 8% de nickel, un acier est dit "austénitique", car il garde la structure de solution solide homogène à température ambiante. Il n'est pas magnétique et n'est pas sensible à la trempe. Par contre il nécessite un apport de molybdène ou de titane pour résister à la corrosion intercristalline à haute température. Ces deux métaux préviennent ou annulent l'effet d'une précipitation de carbure de chrome dans les joints de grains.

On retrouve dans les nickel-chrome, la même cristallisation et les mêmes problèmes de corrosion inter cristalline, que dans les aciers austénitiques, et des précautions doivent être prises pour empêcher la formation de carbure de chrome. L'une de ces précautions est de souder très vite, avec un chalumeau parfaitement réglé, qui protège l'alliage de l'oxygène, mais n'ajoute pas trop de carbone. Du ferrochrome en poudre dans le flux peut compenser la perte de chrome pendant le soudage (1, 7).

O'Brien et ses collaborateurs ont mis en évidence le rapport existant entre les énergies de surfaces et la possibilité pour une soudure en fusion de mouiller le métal de base (23). La qualité de ce mouillage est déterminée par l'énergie de l'interface métal de base - métal d'apport (γ_{SM}) et par les énergies des interfaces flux - métal de base (γ_{SF}) et flux - métal d'apport (γ_{MF}) (Figure No 1).

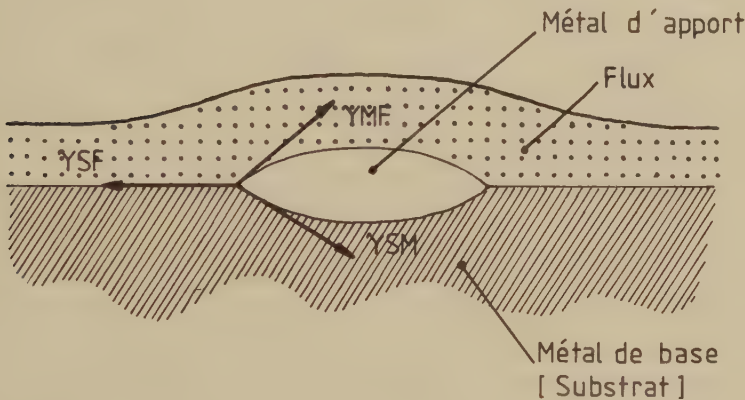


Fig. 1 Forces agissant sur une goutte de soudure, ayant fondu sur une surface métallique, et recouverte d'une couche de flux.

(D'après O'Brien et coll., réf. 23).

Les angles entre les vecteurs, et la grandeur de l'énergie de l'interface, sont définis par l'équation de Dupré.

$$\frac{\gamma_{SF}}{\sin A} = \frac{\gamma_{SM}}{\sin B} = \frac{\gamma_{MF}}{\sin C} \quad (\text{Voir Fig. 2})$$

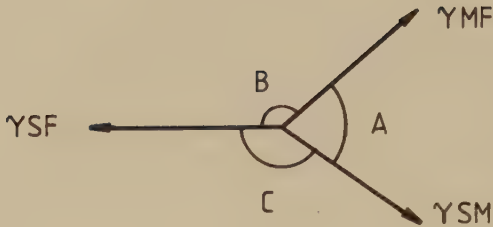


Fig. 2 Vecteurs de forces, et les angles qui les séparent.

O'Brien affirme que le même métal d'apport mouille deux substrats de la même manière, l'or pur et un alliage d'or à couler, à condition qu'un flux soit utilisé. La couche d'oxyde formée sur l'alliage d'or à couler, et qui ne se trouve pas sur l'or pur, a moins d'importance que la présence d'un flux.

Le mouillage du métal de base par le métal d'apport en fusion est d'autant meilleur que l'énergie de l'interface métal de base - métal d'apport (γ_{SM}) est plus faible, et que l'énergie de l'interface flux - métal de base (γ_{SF}) est plus grande (rapport $\gamma_{SF} / \gamma_{SM}$ aussi grand que possible).

L'énergie de l'interface flux - métal d'apport (γ_{MF}) doit être aussi faible que possible.

2.3.3. Les revêtements

Le revêtement à souder permet de fixer la position d'éléments les uns par rapport aux autres pendant le soudage. Il est constitué d'un liant, souvent du plâtre, et d'une charge, du quartz ou l'une de ses formes allotropiques. La charge a pour rôle d'assurer l'expansion thermique du revêtement. On peut trouver en plus dans certains revêtements des désoxydants, produits dégageant du carbone, ou du gaz carbonique à chaud. Dès 700°C, il est nécessaire que du gaz carbonique soit produit et non du simple carbone. Le gaz carbonique protège le plâtre, contrairement au simple carbone, qui en provoque la détérioration précoce. Le soufre libéré provoque la sulfuration des alliages présents. Le graphite produit du carbone, alors que les carbonates et les oxalates dégagent du gaz carbonique (3, 10).

La précision d'une soudure dépend :

- de l'expansion thermique du revêtement
- de l'expansion thermique des pièces à souder
- de la contraction de la soudure lors de la solidification (31)

Le revêtement le mieux adapté est à base de quartz plutôt qu'à base de cristobalite, pour obtenir une expansion plus régulière, et son liant, le plâtre, lui assure une faible expansion de prise. Il faut éviter le contact du revêtement en train de faire sa prise avec de l'eau, car l'expansion hygroscopique que l'on obtiendrait n'est pas souhaitable (31).

Pour souder à haute température, les revêtements à couler pour haute température du commerce, au phosphate ou au silicate, conviennent bien (28). Cependant si des températures supérieures à 700°C doivent être atteintes pendant un temps très court seulement, le plâtre, comme liant, convient très bien, car il n'a pas le temps de se décomposer (3).

2.3.4. L'épaisseur de la soudure

L'espace entre les éléments, qui sera comblé par la soudure, a une grande importance. S'il est trop grand, la contraction totale de la soudure sera trop grande pour être compensée par le revêtement. S'il est trop petit, les éléments, qui se dilatent autant que le revêtement pendant le chauffage, peuvent se toucher, provoquant des déformations. Le contact empêche également la soudure de couler par capillarité sur toute la surface du joint. Pour de nombreux auteurs, l'espace idéal est compris entre 0,15 et 0,2 mm (28, 31). Selon Lautenschlager et ses collaborateurs (20) s'il y a une différence sensible de malléabilité entre l'alliage de base et l'alliage d'apport, comme dans le système laiton et alliage plomb-étain (60/40) par exemple, le rapport r/h (rayon de la section du joint/épaisseur de la soudure) a une influence sur la résistance du joint. Considérons deux pièces soudées bout à bout, et soumises à un test de traction, dans un seul axe. (Fig. 3)

La soudure est supposée plus malléable que l'alliage de base. Une déformation apparaît, et l'adhérence de la soudure, ainsi que sa pénétration dans les irrégularités de surface permettent de retenir la soudure au niveau de l'interface soudure - alliage de base.

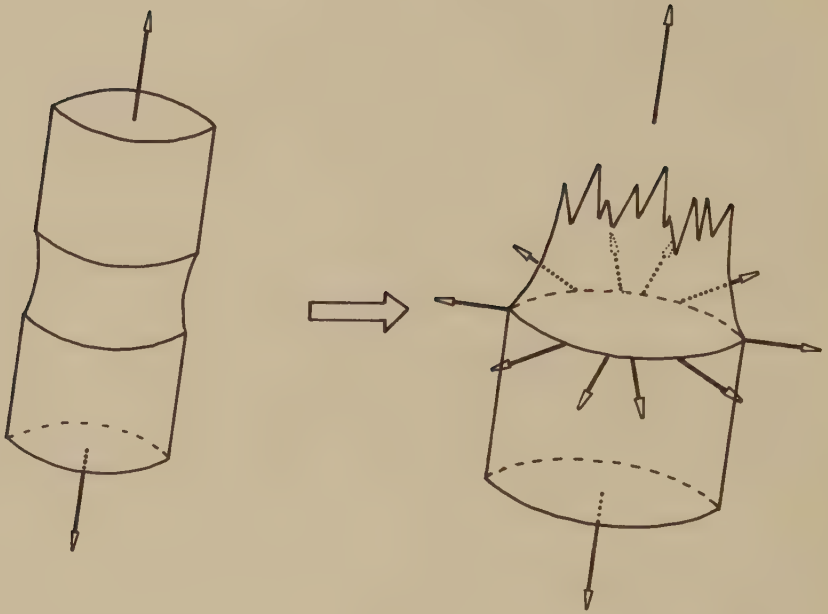


Fig. 3 Deux échantillons joints par soudage sont soumis à une traction axiale. En admettant que la ductilité de l'alliage d'apport est plus petite que celle de l'alliage de base, le joint s'amincit, et des forces radiales apparaissent aux interfaces alliage de base - alliage d'apport. (D'après Lautenschlager et coll., réf.20)

Alors que la contrainte appliquée produit une force axiale de traction, les liaisons de l'interface produisent des forces de cisaillement, radiales et dirigées vers l'extérieur, situées sur les plans des interfaces soudure - métal de base. Ces forces orthogonales, appelées aussi triaxiales, car elles ont des composantes dans les trois axes, produisent une région cônica où s'exercent des forces complexes à l'intérieur de la soudure, la base du cône étant à l'interface. Si l'on réduit l'épaisseur de la soudure, les régions côniques de forces complexes, plus résistantes, occupent une partie plus importante du volume de la soudure, et s'entrecroisent. (Fig. 4)

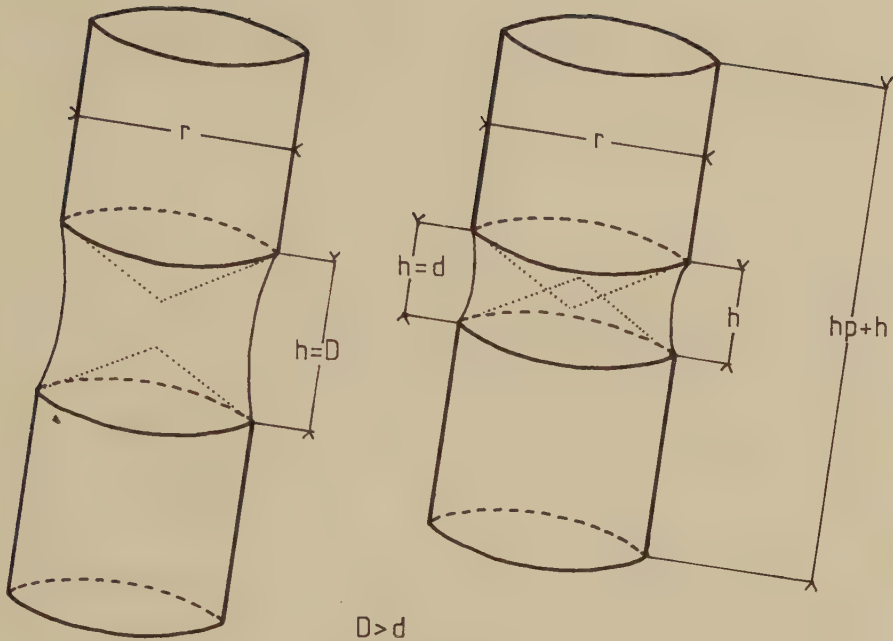


Fig. 4 Lorsque les zones côniques où se trouvent les forces complexes s'entrecroisent, on constate une augmentation de la résistance. La résistance augmente donc lorsqu'augmente le rapport r/h . (D'après Lautenschlager et coll. réf. 20)

Un calcul détaillé de σ_T , la limite élastique théorique d'un joint de soudure sous tension, donne :

$$\sigma_T = \sigma_0 \left(1 + \frac{\pi r}{3 h} \right)$$

où σ_0 , constante, est la force de cisaillement lorsqu'une adhérence parfaite est obtenue aux interfaces. Lorsque le joint devient plus mince, le rapport r/h (rayon/épaisseur de la soudure) augmente et la résistance du joint atteint des valeurs qui peuvent dépasser la résistance de l'alliage d'apport tout seul.

Du fait de différences dans les propriétés mécaniques et dans les longueurs de l'alliage de base et de l'alliage d'apport, on conçoit que la contrainte occasionne des déformations différentes dans ces deux alliages. En faisant un test de traction uniaxial, on obtient un taux de déformation total de

$$\dot{\epsilon}_T = \frac{HS}{h + h_p}$$

où HS est la vitesse de la traverse de la machine de traction, et $h + h_p$ la longueur totale de l'échantillon, soudure comprise. Dans le même test, le taux de déformation de la soudure est

$$\dot{\epsilon}_S = \frac{HS}{h + h_p \cdot \frac{E_S A_S}{E_P A_P}}$$

où E_S et E_P sont les modules d'élasticité, et A_S et A_P les surfaces de section de départ, de la soudure et de l'alliage parent (= alliage de base) respectivement. Dans une soudure en bout à bout, $A_S = A_P$, mais cette valeur est bien plus petite que h_p (longueur du métal de base). Donc, si E_S est plus petit que E_P , la soudure se déforme beaucoup plus que l'ensemble de l'échantillon.

Ce renforcement de la résistance du joint par diminution de son épaisseur (r/h augmente) a été clairement montré par des soudures plomb-étain sur du laiton.

Par contre, la résistance de soudures d'or sur des alliages d'or à couler n'est pas grandement influencée par l'épaisseur du joint, et au mieux, le joint a la même résistance mécanique que l'alliage d'apport lui-même. Les propriétés de ces alliages sont en effet trop proches. Selon l'expérience de Lautenschlager, un fort pourcentage des soudures minces étaient anormalement faibles, car, alors que l'aspect extérieur était net, l'intérieur du joint était poreux, comme le montrait la surface de rupture (20).

La différence de malléabilité entre les alliages nickel - chrome et les soudures d'or est intéressante à étudier sous cet aspect : en soudant l'alliage nickel - chrome avec une soudure à base d'or, plus malléable, on peut, avec un joint fin, prévoir une plus grande résistance à la traction qu'avec un joint épais, pour autant que les problèmes d'adhérence soient résolus et qu'il ne se forme pas de porosité dans le métal d'apport.

2.3.5. La technique

Pour réaliser une soudure forte, ou une brasure, il faut chauffer les pièces à assembler. Plusieurs techniques ont été décrites pour cette opération. Déjà les Anciens savaient que des charbons de bois incandescents dans un brasero, pouvaient, correctement ventilés, chauffer des pièces d'alliage d'or suffisamment pour permettre la fusion de la soudure (33, 34). Mais ils ne se souciaient pas de l'oxydation. Empiriquement, ils avaient constaté que le métal, tant qu'il était dans le brasero, ne s'oxydait pas. Dans un brasero, relativement pauvre en air, la combustion offre un milieu réducteur, riche en carbone.

On peut comparer ce brasero aux chalumeaux modernes, qu'ils soient à air-gaz, oxygène - gaz, oxygène - hydrogène ou oxygène - acétylène. Le comburant contient toujours de l'oxygène, oxydant par excellence, et le carburant toujours de l'hydrogène ou des hydrocarbures qui sont des réducteurs. Par dosage des deux, on peut obtenir une flamme oxydante ou réductrice. On peut aussi obtenir une flamme neutre, qui est la plus chaude, avec les proportions idéales des deux gaz. Dans la flamme neutre elle-même, seule une zone très petite est neutre : celle où la combustion se fait. Les zones environnantes sont soit oxydantes, soit réductrices, suivant le gaz qui s'y trouve en plus grande proportion. La flamme une fois posée sur les pièces à souder, les environne, comme le ferait le gaz du foyer du brasero. Si on a réglé la flamme réductrice de telle sorte qu'elle protège le métal de l'oxydation, il ne faut en aucun cas la retirer des pièces à souder, qui, brusquement environnées d'air alors qu'elles sont chaudes, s'oxyderaient. Le chalumeau offre ainsi le premier milieu artificiel et réglable en plus ! (7) Aujourd'hui, la pos-

sibilité existe de souder avec des atmosphères très variées, adaptées aux besoins. Mentionnons les fours, soit mis sous vide, soit remplis de gaz inertes, azote ou argon. Si on veut protéger un métal de l'oxydation à chaud par le vide, ce dernier doit être nécessairement assez poussé. Le matériel devient vite complexe, car une pompe à diffusion doit compléter la pompe mécanique (29). Le vide doit être poussé jusqu'à 1×10^{-3} torr (28).

Qu'en est-il de l'évolution de la qualité des soudures ? Des soudures autrefois impossibles sont maintenant rendues réalisables, régulières dans leurs qualités et fiables, grâce aux progrès réalisés sur les alliages d'apport et sur le matériel. Mais plusieurs auteurs s'accordent à dire que, aussi étonnant que cela puisse sembler, la résistance d'une brasure ne dépend pas directement du moyen de chauffage (7, 29). La résistance du joint dépend au contraire d'un ensemble de facteurs:

- Le dessin correct du joint, en biseau s'il le faut, sans angles vifs.
- L'espacement des pièces à souder (20).
- La propreté et le dépolissage adéquats du métal de base, le nettoyage chimique ou mécanique des pièces (29, 31).
- La température de brasage.
- La quantité de métal d'apport utilisée, qui doit être la plus faible possible, capable de mouiller les surfaces (1).
- L'endroit où l'on pose le métal d'apport, pour qu'il puisse être attiré par la chaleur à l'emplacement choisi.
- Le moment où l'on pose le métal d'apport : le plus tard possible, pour éviter son oxydation et sa trop grande transformation.
- L'utilisation d'un flux adapté.
- La vitesse de réalisation.

L'appréciation soigneuse et intelligente de ces différents facteurs, en tenant compte des propriétés des métaux de base et d'apport, permet d'obtenir de bonnes brasures (29). Cela constitue ce que l'on peut appeler la technique de soudure. Le choix d'un métal d'apport spécifique pour

obtenir un joint d'une résistance déterminée est impossible. On peut obtenir de bonnes soudures avec n'importe quel métal d'apport moderne du commerce: ce qui importe, c'est que la technique de soudage soit entièrement correcte et adaptée. Dans le cas des soudures dentaires, on doit cependant choisir les métaux d'apport les plus résistants à la corrosion.

Pour conclure, disons que le "coup de main" de l'utilisateur, et son habileté à suivre une technique, régissent tout autant la résistance d'une soudure que le matériel utilisé (29).

3. PARTIE EXPERIMENTALE

Différentes conditions de soudage, appliquées à deux alliages nickel - chrome différents, vont être testées par des essais de traction sur une machine d'essai universelle Instron; celle-ci est formée d'un banc fixe et d'une traverse qui s'en éloigne grâce à deux vérins à vis. La contrainte subie par l'échantillon fixé à l'aide de pinces entre ce banc fixe et la traverse mobile est enregistrée tout au long de l'essai jusqu'à la rupture. La force nécessaire à la rupture du joint soudé, divisée par la surface de celui-ci, représente sa résistance à la rupture par traction.

Le diagramme des essais reproduit dans le Tableau 1 résume le déroulement de toute l'expérience jusqu'à l'essai de traction et à l'analyse des résultats.

3.1. Méthode de travail

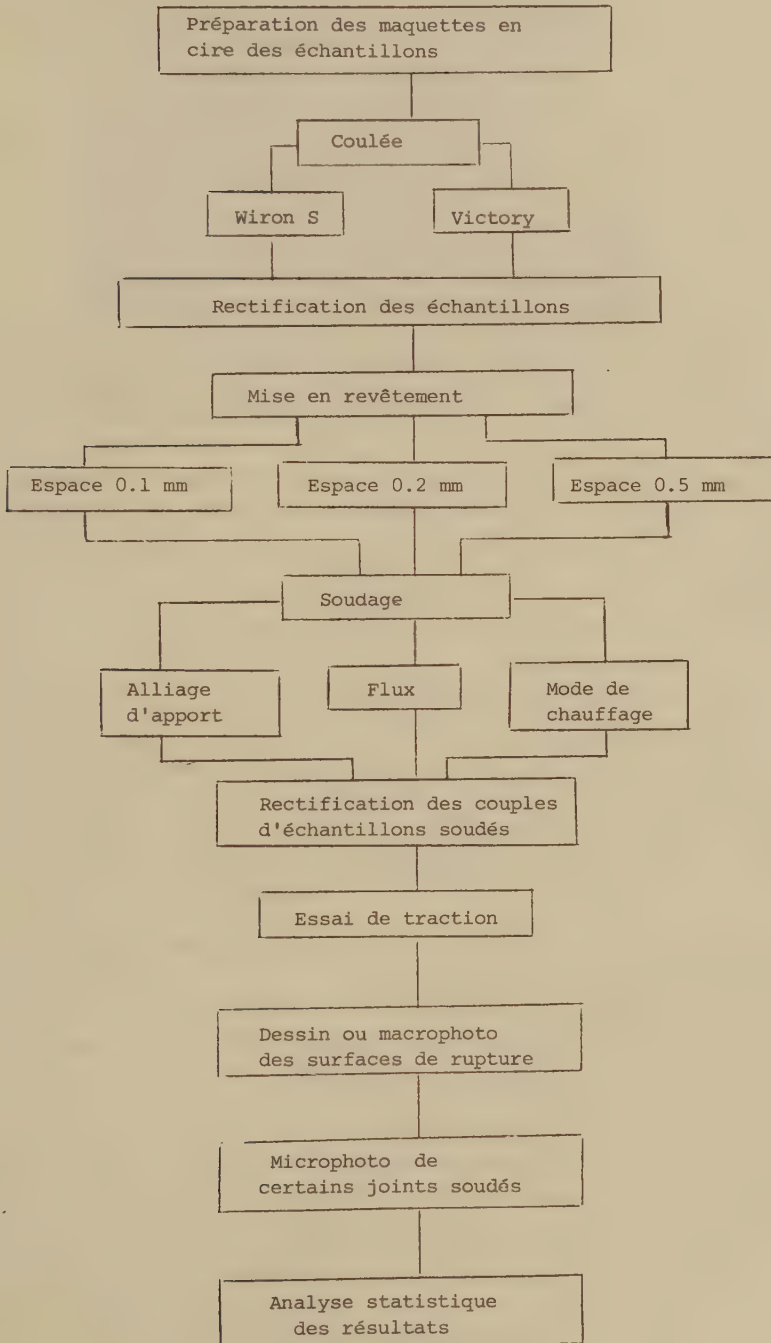
3.1.1. Réalisation des échantillons

Pour le choix d'une forme d'échantillon, on est arrivé à un compromis se rapprochant autant que possible d'un élément de prothèse dentaire conjointe, tout en gardant la possibilité du montage du couple d'échantillons une fois soudé dans l'appareil Instron.

Chaque échantillon mesure 25 mm de longueur, 5 mm de diamètre et se termine, du côté où il sera soudé à un homologue, par un tronc de cône.

Le sommet de ce tronc de cône a un diamètre de 3 mm et sa hauteur est de 2 mm. Une si faible hauteur correspond à une rapide augmentation du diamètre, ce qui fait que l'on peut négliger les déformations du métal de base lors de la traction. On retrouve les mêmes conditions sur des éléments de prothèse conjointe.

Tableau 1 : Diagramme du déroulement des essais



L'échantillon est plané latéralement en 2 méplats opposés, pour assurer une bonne tenue dans les pinces de la machine d'essai Instron. La Figure 5 représente, à l'échelle 5 : 1, l'échantillon de 25 mm de long et de 5 mm de diamètre.

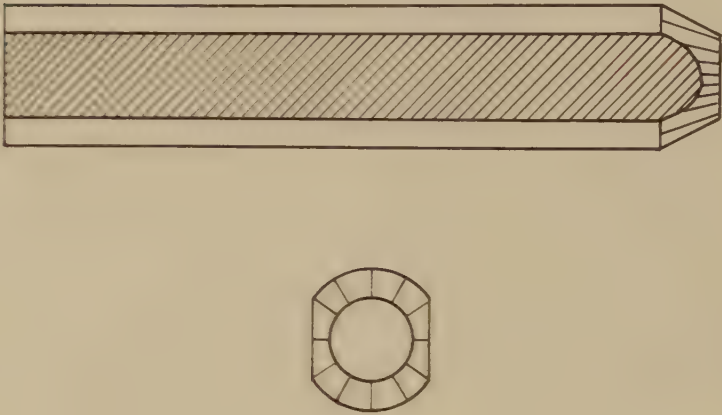


Fig. 5 Maquette d'un barreau d'essai pour les tests de résistance des joints soudés. (Echelle 5 : 1)
 Vue de profil, avec le plan offrant prise à la pince Instron
 hachurée
 Vue en plan du tronc de cône, dont le sommet représente la surface de soudage.

La Figure 6 présente deux paires d'échantillons après la coulée.

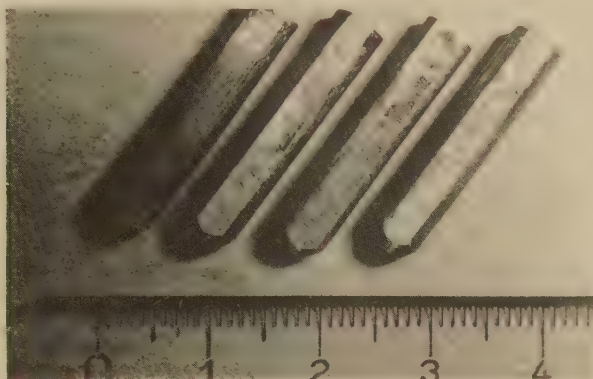


Fig. 6' Echantillons coulés en alliage nickel-chrome, prêts pour les essais de soudage.

Des maquettes des échantillons ont été réalisées, au tour de mécanicien et à la lime, en plexiglas. La meilleure a été utilisée pour obtenir un moule négatif en deux parties en élastomère polyéther Impregum. Un canal en forme d'entonnoir a été fraisé dans la masse d'Impregum pour pouvoir remplir ce moule avec de la cire. Avant de verser cette dernière, l'ensemble du moule était isolé avec une très fine couche de silicone fluide. La cire utilisée, cire à inlay SS White noire, se déforme très peu, une fois solidifiée. Elle était versée à l'état liquide dans le moule par l'entonnoir, puis était comprimée, toujours par l'entonnoir, toutes les 10 secondes pendant une minute, afin de compenser, pendant que la cire était encore plastique, la perte de volume due à la contraction de refroidissement et de solidification.

44 échantillons ont ainsi été réalisés en cire, avec une précision très acceptable, même si elle était moins grande qu'avec des échantillons en plexiglas. Les légers défauts pouvaient facilement être corrigés sur la pièce une fois coulée, l'opération de coulée ne présentant aucune difficulté particulière. Des essais de coulée en mettant en revêtement directement des échantillons en plexiglas ont été décevants, car le revêtement utilisé, (Ceramigold)^{*)}, se fendait pendant le chauffage, et de nombreuses imper-

*) Whip Mix, Louisville, Kentucky, USA

fections étaient à éliminer des pièces coulées, quand la masse du métal en fusion ne s'échappait pas complètement à la coulée.

Pour obtenir 22 échantillons de chaque alliage, il en a été coulés 24 en Wiron S ^{**}), et 24 en Victory ^{***}), au chalumeau oxy-acétylénique. 4 échantillons, ont été coulés à la fois, et les deux moins bons parmi les 24 ont été éliminés.

La Figure 7 présente une coulée type, formée de quatre échantillons en alliage nickel-chrome.



Fig. 7 Quatre échantillons en nickel-chrome bruts de coulée, sur leurs tiges de coulées, et avec leurs événements.

Les échantillons ont été ensuite dégrossis, rectifiés, et numérotés.

^{**}) Bego, Brême, RFA

^{***}) Inter Unitek, Zürich, Suisse.

3.1.2. Mise en revêtement.

Un soin tout particulier a été voué au maintien des deux échantillons dans le même axe durant toute l'opération de soudage. Les méplats latéraux ont également été maintenus dans un même plan, pour éviter toute flexion et toute torsion durant le test de traction. La mise en revêtement a été influencée par ce souci.

Au début, un banc de montage en laiton a été utilisé avec une cale d'alignement en résine méthacrylique, permettant de mettre en revêtement un couple d'échantillons. (Figure 8)



Fig. 8 Deux échantillons alignés sur le banc de laiton à l'aide d'une cale de résine méthacrylique. La jauge d'épaisseur maintient l'espacement désiré entre les surfaces de soudage.

Par la suite, des plaques de glace à miroir, et une règle d'acier (burin de 10 mm x 10 mm de section) servant de cale d'alignement ont permis de mettre en revêtement 3 couples d'échantillons à la fois, avec une précision au moins aussi grande, sinon supérieure (Figure 9).

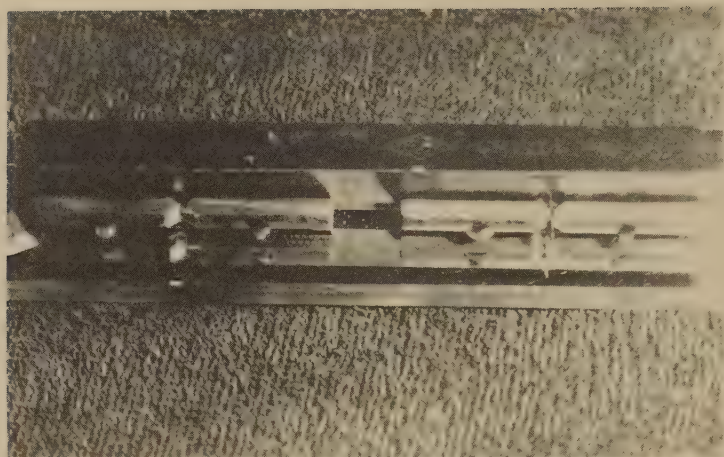


Fig. 9 Deux des trois couples d'échantillons en nickel-chrome, alignés sur un rectangle de glace, et calés contre un barreau d'acier. Noter la jauge d'épaisseur entre les surfaces de soudage du couple de droite..

L'opération se réalise ainsi : un premier échantillon est mis en place, calé contre la règle il repose sur la glace par l'un de ses méplats. Une goutte de cire collante le fixe. Le second échantillon, reposant aussi sur la glace par un méplat est glissé à sa rencontre contre la règle métallique. Une jauge d'épaisseur en acier une fois serrée entre les deux échantillons, le second barreau est à son tour fixé à la glace par une goutte de cire collante. La jauge est alors enlevée délicatement et les deux troncs de cône immédiatement noyés de cire rose^{*}. La règle n'est retirée qu'une fois les trois paires d'échantillons positionnées sur la glace. Des passages pour la flamme du chalumeau sont modelés autour de la future soudure au moyen de cire rose puis, après avoir isolé la glace par de la cire, un coffrage en cuivre et en cire est monté autour de la glace, et entre les paires d'échantillons. Du revêtement "Gros grain"^{**} est alors coulé dans le moule en trois parties ainsi réalisé. (Fig. 10)

^{*}) Belladi, Zürich, Suisse

^{**}) Cendres et Métaux, Bienne, Suisse

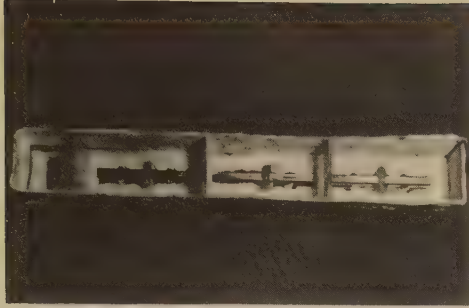


Fig. 10 Trois couples d'échantillons en nickel-chrome, alignés et collés sur un rectangle de glace, prêts pour la mise en revêtement. A cette fin, la glace est isolée par une fine couche de cire et un coffrage fait de feuilles de cuivre et de cire est réalisé autour des couples d'échantillons.

3.1.3. Opération de soudage

Dans tous les cas où le chalumeau a été utilisé, un préchauffage des échantillons en revêtement a été effectué, au four à 700°C en atmosphère ambiante. Tous les couples d'échantillons ont été laissés au moins 10 minutes dans le four, une fois les 700° atteints. Les surfaces à souder étaient protégées de l'oxydation à chaud par du flux déjà en place. Avant la mise au four, le flux a été très soigneusement glissé entre les pièces sous forme d'une pâte obtenue par de la poudre de flux en suspension dans de l'alcool. L'alcool a été choisi pour éviter la présence d'eau dans la zone de la soudure.

Le soudage lui-même a été réalisé tout de suite après, exactement comme lorsqu'on soude entre eux des éléments de prothèse conjointe. Les paillons de soudure, avant leur mise en place sur les joints, étaient soigneusement enrobés de flux. La soudure intervenant très rapidement, le revêtement "gros grain" s'est parfaitement comporté d'une manière constante.

Lors des soudages au four, le mode d'emploi du métal d'apport a été suivi et la vitesse de chauffage recommandée a été respectée.

Après soudage, les couples d'échantillons ont été posés sur une surface plane, ce qui a permis de constater qu'aucun n'était resté parfaitement aligné. Mais les retouches nécessaires pour rendre les méplats à nouveau parallèles ont été suffisamment minimes pour pouvoir être faites rapidement sur du papier d'émeri no 200, sous eau.

Les excès de soudure ont été enlevés, par tournage, et les joints ramenés aussi près que possible de 3 mm de diamètre. Plusieurs ruptures de soudage sont apparues durant cette opération, car le burin, à peine émoussé, se plantait facilement dans les alliages nickel-chrome.

3.1.4. Matériaux testés.

L'ensemble des matériaux utilisés est indiqué dans le Tableau No 2.

Tableau No 2

TYPE	MARQUE
Alliages nickel-chrome	Victory *
	Wiron S **
Soudures : Non précieuses	Nicrobraz 210 ***
	Victory HF *
	Wiron **
Précieuse (haute fusion)	Armator Forte ****
Précieuses (basse fusion)	UGDO No 2 ****
	Victory LF *
Flux	Nicrobraz ***
	Victory HF *
	Victory Oxynon *
	Wiron **
	Soldering Flux Paste +
Revêtements : A couler	Ceramigold ++
A souder	"Gros grain" Cendres et Métaux +++

- * Inter-United, Zurich, Suisse
- ** BEGO, Brême, Rep.fédérale d'Allemagne
- *** Wall Colmomoy, 95400 Villiers-le-Bel, France
- **** Usine Genevoise de Dégrossissage d'Or, Genève, Suisse
- + SS White company, Philadelphia, USA
- ++ Whip-Mix Corporation, Louisville, USA
- +++ Cendres et Métaux S.A. Bienne, Suisse

Deux alliages de base nickel-chrome ont été testés, le Wiron S et le Victory.

Parmi les alliages d'apport testés, certains étaient non précieux, à base de nickel - chrome, comme le Microbraz 210, le Victory HF (haute fusion) et la soudure Wiron. D'autres étaient des alliages précieux, comme la soudure Armator Forte, l'UGDO No 2 et l'alliage Victory LF, ces deux derniers étant des soudures basse fusion.

Les flux Microbraz, Wiron, Victory Oxymon et le flux incorporé à la pâte à souder Victory HF, ont été utilisés, ainsi que le borax de S.S. White en solution dans de la vaseline.

Le détail des tests sera donné au paragraphe 3.2. "Etude par la courbe de rupture".

3.1.5. Essais de traction

Les couples d'échantillons soudés et prêts pour l'essai de traction ont été marqués, à l'encre, de deux lignes parallèles situées de part et d'autre du joint et à 7,5 mm de celui-ci. Ainsi, il a été facile de monter la paire d'échantillons dans les pinces Instron avec la soudure exactement centrée, pour un écartement de départ des pinces de 15 mm.

La traction est effectuée à une vitesse de la traverse de 0,5 mm par minute. Durant toute la traction, la courbe de la force est enregistrée, jusqu'à rupture du joint soudé. Le déplacement de la traverse est couplé avec le déroulement du papier de l'enregistreur (abscisse), alors que la force s'inscrit en ordonnée, sur une échelle de 500 ou de 1000 Kg.

Avant l'essai, une mesure du diamètre du joint est faite au 1/10 de mm déterminant ainsi la surface de soudage. La force nécessaire à la rupture, en Kg sur la courbe enregistrée, a ainsi pu être transformée en contrainte de rupture, exprimée en MN/m^2 .

3.1.6. Macrophotographie

Au début, des dessins des surfaces de rupture ont été réalisés d'après les observations à la loupe binoculaire, pour mettre en évidence les zones de rupture aux interfaces alliage de base - alliage d'apport ou, au contraire, dans la masse de l'alliage d'apport. Les porosités et les inclusions de flux ont été aussi rapportées.

Par la suite, des macrophotographies en noir et blanc, des surfaces de rupture, on été prises avec un grossissement de 3 fois sur le négatif. La pellicule Ciba Ilford FP 4 a été utilisée, avec des temps de pose de 0,5 seconde et de 1 seconde, en éclairage bidirectionnel.

3.2. Etude par l'essai de rupture du joint soudé

La résistance à la rupture des joints de soudage a été examinée en fonction de cinq facteurs principaux : les techniques de chauffage, les alliages d'apport, les flux, l'épaisseur des joints et les alliages de base. Les conditions propres à chacun de ces essais sont brièvement décrites ci-dessous.

3.2.1. Techniques de chauffage

Plusieurs techniques de chauffage ont été essayées, tant sur des soudures à haute fusion que sur des soudures à basse fusion.

Avec l'alliage d'apport à haute fusion Wiron, à base de métaux vils, dont la température de travail se situe entre 1150°C et 1175°C , sept soudures ont été réalisées sur des échantillons en Wiron S, en utilisant le chalumeau oxy-acétylénique. On a choisi pour cela une épaisseur du joint de 0,2 mm et du flux Wiron. Deux de ces soudures ont été assez fragiles pour se casser pendant les manipulations et les cinq autres ont pu être testées en traction. Dix soudures identiques, mais réalisées avec un chalumeau oxygène - gaz de ville (gaz naturel), ont montré la supériorité de ce dernier dispositif, qui a été adopté pour la suite des essais haute fusion.

Cette comparaison sera développée dans les chapitres 4 "Résultats" et 5 "Analyse des résultats".

Avec les soudures à basse fusion, destinées à être réalisées après la cuisson de la porcelaine sur l'alliage de base, des essais ont eu lieu avec le chalumeau butane-oxygène et avec un four sous vide. L'alliage de base Victory, le flux Victory et l'alliage d'apport Victory LF, utilisés pour cet essai, provenaient du même fabricant. Le diagramme de l'opération au four, correspondant au mode d'emploi du fabricant, fut le suivant : Séchage de 30 minutes à 450°C , puis sous vide, montée de 750°C à 880°C , à une vitesse de chauffage de 50°C par minute.

3.2.2. Alliages d'apport

Parmi les alliages d'apport précieux, la soudure Armator Forte a été choisie comme soudure à haute fusion. Son liquidus de 1100°C correspond à la température de travail préconisée. Il est suffisamment haut pour permettre la cuisson de la porcelaine après soudage des différents éléments métalliques. L'Armator Forte a été utilisée avec des épaisseurs de 0,1, 0,2 et 0,5 mm au niveau du joint.

La soudure à haute fusion Armator Forte a aussi été utilisée pour réaliser un plaquage préliminaire des surfaces à souder, le soudage proprement dit se faisant dans un deuxième temps en unissant les surfaces plaquées avec une soudure à basse fusion (technique du soudage secondaire). La soudure précieuse à basse fusion UGDO No 2, dont le liquidus et la température préconisée de soudage sont de 820°C , a été utilisée dans cette dernière étape. On a ainsi simulé une soudure secondaire, c'est-à-dire se réalisant après la cuisson de la porcelaine, mais dans des conditions améliorées par la présence d'un alliage d'or à haute fusion, appliqué avant la cuisson de la porcelaine sur les pièces à souder.

Pour les soudures secondaires où l'alliage d'apport à basse fusion s'applique directement sur l'alliage de base Ni-Cr., la soudure précieuse Victory a été utilisée.

Trois alliages d'apport à base de métaux vils ont été utilisés, tous à haute fusion, c'est-à-dire, ne pouvant être utilisés qu'avant la cuisson de la porcelaine sur les éléments à souder. Il s'agit de la soudure Wiron, de la soudure Victory HF et de la soudure Microbraz 210. Cette dernière est celle dont les indications du fabricant sont les plus complètes et dont on connaît la composition :

Cr :	19,0 %	W :	4,0 %
B :	0,8	C :	0,4
Ni :	17,0	Co :	le reste
Si :	8,0		

Son solidus est de 1110°C , son liquidus de 1150°C , sa température de travail idéale de 1175°C , mais elle peut être utilisée de 1150°C à 1230°C . Elle résiste à l'oxydation jusqu'à 1200°C et possède une résistance à la corrosion satisfaisante dans les sels de Na et de K, ainsi que dans l'eau et la vapeur d'eau à haute température.

La soudure Victory HF présente la particularité d'être livrée en poudre, directement mélangée avec le flux, et d'être transformée ensuite en pâte par adjonction d'eau distillée.

La soudure Wiron, qui s'est avérée être la plus facile à manier, a été choisie pour faire des essais avec différentes épaisseurs de joint, 0,1, 0,2 et 0,5 mm (voir 3.2.4. "Epaisseur du joint").

3.2.3. Flux

Au cours de son action, le flux doit se combiner avec les produits qui rendraient impossible ou qui altéreraient la soudure. Il doit également empêcher la formation de ces produits, les rendre inopérants ou les dissoudre pendant le soudage. Les caractéristiques physiques d'un flux sont utilisables comme indicateur de température.

Par des mélanges d'acide borique, de borates, de fluoborates et de fluorures, on obtient des flux efficaces aux températures de soudage des différents alliages d'apport. Les fluoborates et les fluorures, utilisables au-dessous de 1100°C , sont de bons solvants des oxydes de chrome.

Chacun des trois alliages d'apport vils à haute fusion a été livré avec son propre flux et a été utilisé avec celui-ci, la poudre de soudure Victory HF étant déjà mélangée au flux.

Le flux Wiron, particulièrement fluide à chaud, a été choisi également pour les soudures à l'Armator Forte, alliage d'apport précieux à haute fusion.

Les joints soudés réalisés avec l'alliage d'apport Victory LF (basse fusion) ont été protégés avec du flux Oxymon, livré avec l'alliage.

Pour les soudures secondaires à l'alliage à basse fusion UGDO No 2, pratiquées sur les plaquages d'Armator Forte, on a utilisé la pâte à souder de S.S. White, contenant des borates et de l'acide borique en solution dans de la vaseline.

La présence d'acide borique est très importante dans un flux, car il permet sa mise en solution dans l'eau chaude et facilite son élimination des pièces une fois soudées. Après le soudage, tout le flux doit être éliminé, car, en milieu buccal, les restes de flux provoquent la corrosion des alliages en présence.

3.2.4. Epaisseur du joint

Différentes épaisseurs de joint : 0,1, 0,2, 0,5 mm, ont été testées sur des éprouvettes en Wiron S, en utilisant les alliages d'apport Wiron et Armator Forte. La dureté et la malléabilité de l'alliage d'apport Wiron est proche de celle de l'alliage Wiron S dont sont faits les échantillons. La dureté de l'Armator Forte, par contre, est bien moins grande. On a voulu, par ces tests, mettre en évidence l'influence des cônes de forces résultantes qui, selon Lautenschlager et ses collaborateurs, apparaissent dans une soudure moins dure que les pièces qu'elle unit et sont capables d'augmenter la résistance du joint lorsqu'il est d'assez faible épaisseur pour que ces cônes s'entrecroisent.

3.2.5. Alliages de base

Les résultats obtenus avec l'alliage Wiron S devant être confirmés, quelques séries d'essais ont été répétées avec des éprouvettes en Victory.

Les essais de soudage utilisant les alliages d'apport Wiron et Armator Forte, avec une épaisseur de joint de 0,2 mm ont été choisis comme contrôle.

Les essais de différentes épaisseurs de joint et l'essai d'une soudure secondaire à basse fusion sur des plaquages de soudure précieuse à haute fusion, ont été réalisés sur l'alliage de base Wiron S.

Les soudures Victory LF et HF ont été essayées sur l'alliage de base Victory.

3.2.6. Statistiques

Pour chaque type de soudage, onze exemplaires ont été réalisés dans les mêmes conditions. Cependant, à cause de ruptures survenues pendant les manipulations, ou de défauts majeurs dans les joints soudés, il n'a pas été possible d'effectuer systématiquement onze essais de traction pour chaque type de soudage.

Pour chaque série, comprenant de 5 à 11 résultats de traction, la moyenne, la déviation standard (écart type) et le coefficient de variation (valeur

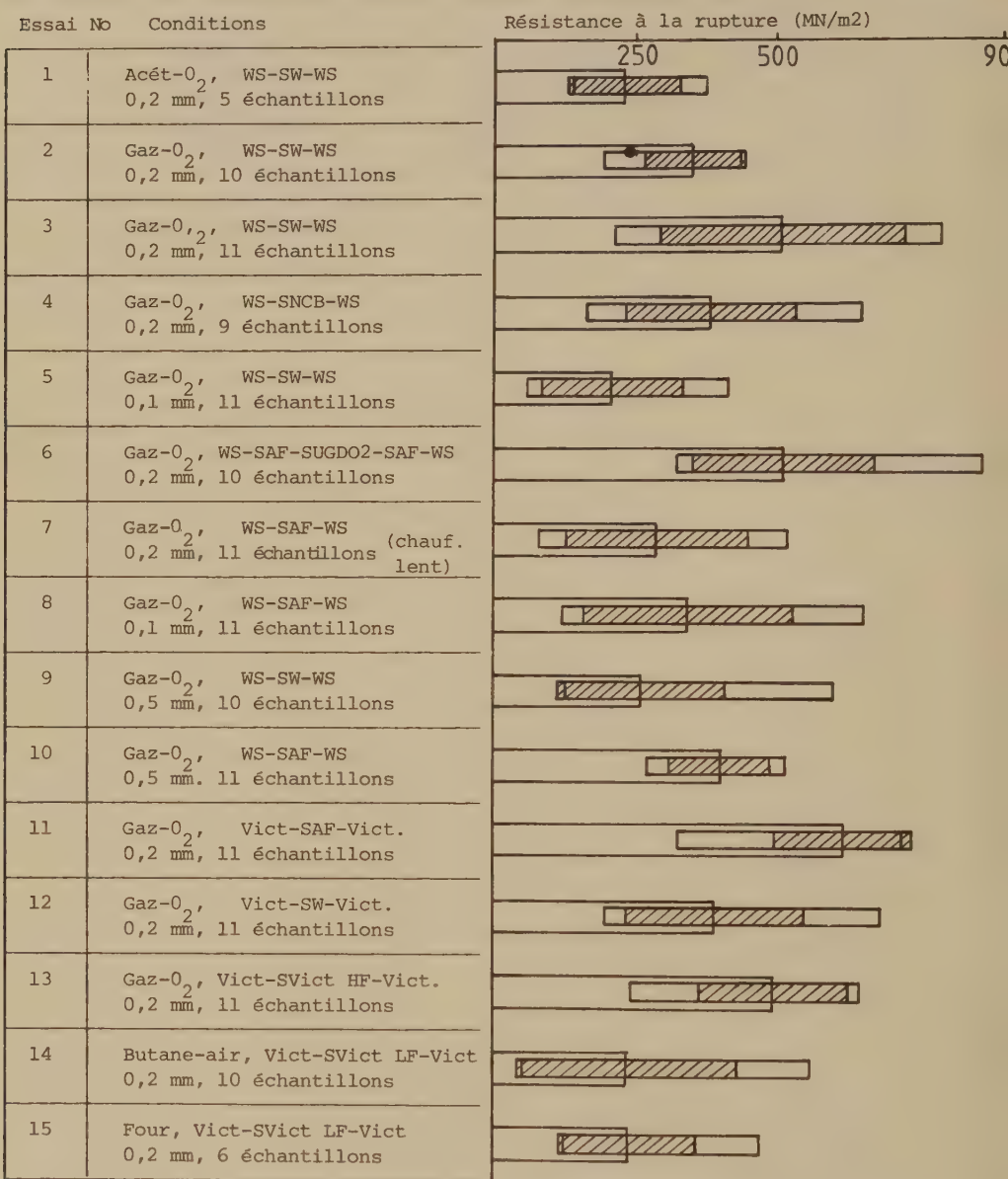
en pourcents de la déviation standard par rapport à la moyenne) ont été calculés.

Les moyennes des contraintes de rupture de différentes séries ont été comparées, à l'aide d'analyses de variance à un ou deux facteurs, avec des nombres inégaux de résultats par série. Dans les cas de mise en évidence de différences, statistiquement significatives, les moyennes faisant l'objet de la comparaison ont été classées selon le test de Duncan, qui permet de préciser entre quelles moyennes se situent des différences significatives.

4. RESULTATS

Les résultats obtenus pour les 15 séries d'essais ont été regroupés sous forme graphique dans le Tableau 3 où l'on voit apparaître les moyennes, les écarts-types et les valeurs individuelles extrêmes. Dans le Tableau 4 on voit apparaître en plus, sous forme numérique, le nombre d'échantillons mesurables dans chaque série et le coefficient de variation.

Tableau 3 : Résistance à la rupture. Histogramme de l'ensemble des résultats



Légende :

WS : Alliage de base Wiron S
 Vict : Alliage de base Victory
 SW : Soudure Wiron
 SAF : Soudure Armator Forte
 SNCB : Soudure Nicrobraz 210
 SVict HF : Soudure Victory haute fusion
 SVict LF : Soudure Victory basse fusion
 SUGDO2 : Soudure UGDO No 2 basse fusion

Les mm indiqués donnent l'épaisseur du j

Valeur Maximale
 Moyenne + écart type
 Moyenne
 Moyenne - écart type
 Valeur minimale



Tableau No 4 : Résistances à la rupture. Valeurs numériques

Essai No	Chauffage	Soudure	Distance (mm.)	n	$\bar{x}$ (MN/m ²)	D.S.	C.V. (%)
1	Acét-0 ₂	WS-SW-WS	0,2	5	234,19	98,21	41,9
2	Gaz-0 ₂	WS-SW-WS	0,2	10	351,40	87,02	24,8
3	Gaz-0 ₂	WS-SAF-WS	0,2	11	534,0	215,92	40,4
4	Gaz-0 ₂	WS-SNCB-WS	0,2	9	386,89	148,56	38,4
5	Gaz-0 ₂	WS-SW-WS	0,1	11	204,0	122,71	60,1
6	Gaz-0 ₂	WS-SAF-SUGDO2-SAF-WS	0,2	10	513,17	157,67	30,7
7	Gaz-0 ₂	WS-SAF-WS (lente)	0,2	11	279,17	153,11	54,8
8	Gaz-0 ₂	WS-SAF-WS	0,1	11	341,68	183,40	53,7
9	Gaz-0 ₂	WS-SW-WS	0,5	10	260,48	150,69	57,8
10	Gaz-0 ₂	WS-SAF-WS	0,5	11	401,72	91,07	22,7
11	Gaz-0 ₂	Vict-SAF-Vict	0,2	11	622,76	122,73	19,7
12	Gaz-0 ₂	Vict-SW-Vict	0,2	11	390,91	155,45	39,8
13	Gaz-0 ₂	Vict-SVict HF-Vict	0,2	11	500,07	132,34	26,5
14	Butane-Air	Vict-SVict LF-Vict	0,2	10	232,84	196,23	84,3
15	Four)vide)	Vict-SVict LF-Vict	0,2	6	233,87	119,91	51,3

Légende :

WS : Alliage de base Wiron S

Vict : Alliage de base Victory

SW : Soudure Wiron

SAF : Soudure Armator Forte

SNCB : Soudure Nicrobraz 210

SVict HF : Soudure Victory Haute fusion

SVict LF : Soudure Victory Basse fusion

SUGDO2 : Soudure UGDO No 2 basse fusion

n : Nombre d'échantillons mesurables

$\bar{x}$: Moyenne des forces de rupture

D.S. : Déviation standard (=écart-type)

$$D.S. = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

C.V. : Coefficient de variation. $C.V. = \frac{D.S. \cdot 100}{\bar{x}}$

5. ANALYSE DES RESULTATS

5.1. Résistance à la rupture de différentes soudures

Lorsque l'on compare la résistance de ces différents types de soudures, il apparaît clairement que les soudures à haute fusion, l'alliage d'apport non précieux Victory haute fusion et l'alliage d'apport précieux Armator Forte, donnent les meilleurs résultats comme l'indique la Fig. 11. Le Tableau 5 présente les résultats de l'analyse de variance et la classification des moyennes selon la technique de Duncan. Les valeurs soulignées par un trait continu ne diffèrent pas entre elles de façon statistiquement significatives. Seules les valeurs, non réunies par un trait continu, diffèrent entre elles, comme par exemple les moyennes des essais 15 et 13. Seule la nature de l'alliage d'apport a été prise en considération (analyse de variance à un facteur).

Tableau 5 : Comparaison des alliages d'apport. Analyse de variance et classification selon Duncan.

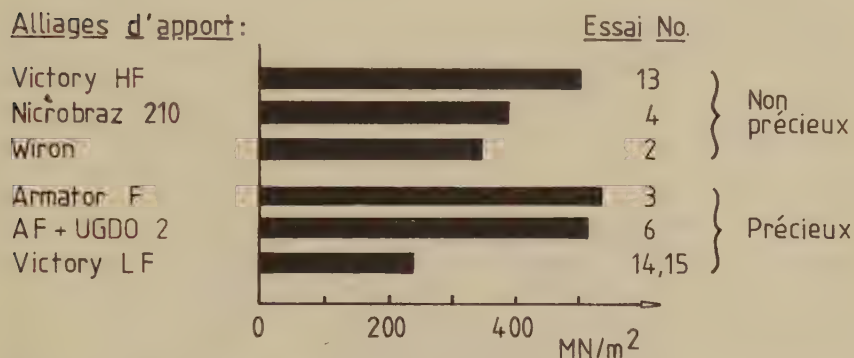
ANOVA		Classification de Duncan						
1. Comparaison entre tous les alliages d'apport								
F = 5.91 (F ^{0.01} _{6,60} = 3.12) ***	Essais No							
	14	15	2	4	13	6	3	
	233*	234	<u>351</u>	<u>387</u>	500	513	<u>534</u>	
2. Comparaison entre alliages d'apport non-précieux								
F = 4.09 (F ^{0.05} _{2,27} = 3.35) **	Essais No							
	2	4	13					
	351*	<u>387</u>	<u>500</u>					
3. Comparaison entre alliages d'apport précieux								
F = 7.65 (F ^{0.01} _{3,33} = 4.48) ***	Essais No							
	14	15	6	3				
	<u>233*</u>	<u>234</u>	<u>513</u>	<u>534</u>				

(Légende page suivante)

Légende Tableau 5 :

- * Moyenne des charges de rupture, en MN/m^2
- ** Différences significatives entre les moyennes comparées (degré de protection de 0,05)
- *** Différences significatives entre les moyennes comparées (degré de protection de 0,01)

(Les caractéristiques des essais sont données dans le Tableau 3)



Alliages de base: Wiron "S" et Victory

Figure 11 : Comparaison des moyennes des résistances à la rupture de six alliages d'apport différents

Cependant, une résistance à la rupture aussi grande que celle des soudures à haute fusion (essais 3 et 13) peut être obtenue en soudant entre eux des éléments en alliage nickel-chrome après la cuisson de la porcelaine (soudage secondaire). Grâce à l'application, sur les surfaces à souder et avant la cuisson de la porcelaine, d'une soudure précieuse à haute fusion, on obtient, avec la soudure à basse fusion employée secondairement après les cuissons de la porcelaine, un joint qui n'est pas significativement moins résistant que s'il était réalisé avec une soudure à haute fusion. Dans notre cas, la soudure UGDO No 2, à basse fusion, a été employée pour le joint et la soudure Armator Forte, à haute fusion, pour le recouvrement des surfaces à souder.

Il faut éviter d'utiliser une soudure à basse fusion directement sur un alliage nickel-chrome, comme l'ont démontré les essais faits avec l'alliage d'apport à basse fusion Victory LF. Cette soudure s'est révélée difficile à maîtriser au chalumeau, peut-être à cause du manque d'efficacité du flux, prévu pour ne pas endommager la porcelaine. La soudure ne mouillait le métal de base que partiellement et seulement si le chauffage durait moins de 30 secondes. Sur 11 soudages, réalisés au chalumeau butane-oxygène, 10 ont pu être testés en traction. Au four, en suivant scrupuleusement les indications du fabricant, les difficultés ont été tout aussi grandes et seulement 6 soudures sur les 11 ont pu être testées. Ce type de joint est déconseillé en raison des nombreux échecs enregistrés et des nombreux vides que l'on peut voir dans les joints en examinant les surfaces de rupture après traction, vides où se trouvent des oxydes et des restes de flux qui constituent un terrain favorable pour la corrosion. Si la moyenne des charges de rupture est comparable, pour les soudages au chalumeau et pour ceux réalisés au four, l'écart-type est moins grand avec le chauffage au four et, les 6 soudages obtenus avec ce moyen de chauffage, bien que faibles, auraient été utilisables en bouche :

Le joint le plus faible a atteint une résistance de 117 MN/m^2 , la moyenne étant de 234 MN/m^2 .

Avec le chauffage au chalumeau, le coefficient de variation a atteint 84,3% et, certains soudages, dont nous avons pu mesurer la charge de rupture, auraient présenté de sérieux risques de rupture dans les conditions buccales, avec une résistance inférieure à 50 MN/m^2 . Les figures 12 et 13 montrent la différence d'aspect des surfaces de rupture d'un bon et d'un mauvais soudage.

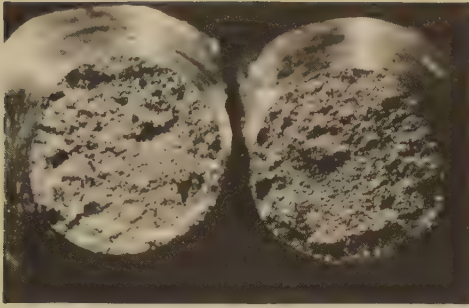


Fig. 12 Photographie des surfaces de rupture de l'un des meilleurs soudages obtenus. La rupture est cohésive, dans la masse du métal d'apport, et présente un relief d'apparence bas et serré. (Alliage de base Victory, alliage d'apport Armator Forte, écartement du joint de 0,2 mm, charge de rupture de 731 MN/m^2).

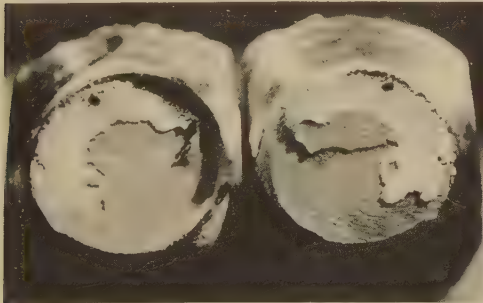


Fig. 13 Photographie des surfaces de rupture d'un mauvais soudage. La rupture est de type adhésif, c'est-à-dire qu'elle s'est produite au niveau des interfaces alliage de base - alliage d'apport. (Alliage de base Victory, alliage d'apport Victory LF, écartement du joint 0,2 mm, charge de rupture de 117 MN/m^2).

5.2. Influence de l'épaisseur du joint

L'épaisseur du joint de 0,2 mm s'est révélée la meilleure, avec les alliages d'apport à haute fusion, tant précieux (essai No 3 : Armator Forte) que non précieux (essai No 2 : soudure Wiron), comme l'indiquent les résultats présentés dans la figure 14.

Les résultats de l'analyse statistique (analyse de variance à deux facteurs) apparaissent dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Comparaison des épaisseurs de joint et des alliages d'apport.
Analyse de variance à deux facteurs

Facteur A : Epaisseur du joint	Facteur B : Type de soudure		ANOVA Facteur A
	Wiron	Armator Forte	
0.1 mm	205 (MN/m ²)	345 (MN/m ²)	F = 5.79 (F ^{0.01} _{2,54} = 5.04) ***
0.2 mm	352	527	
0.5 mm	261	402	
ANOVA Facteur B	F = 14.40 (F ^{0.01} _{1,54} = 7.17) ***	ANOVA Interaction des facteurs A et B	F = 0.087 n.s.

*** Différences significatives entre les moyennes comparées
 (degré de protection de 0.01)

n.s. non significatif (il n'y a pas d'interaction entre l'épaisseur
 du joint et le type de soudure; les variations dues à l'épais-
 seur du joint sont indépendantes du type de soudure).

ANOVA analyse de variance

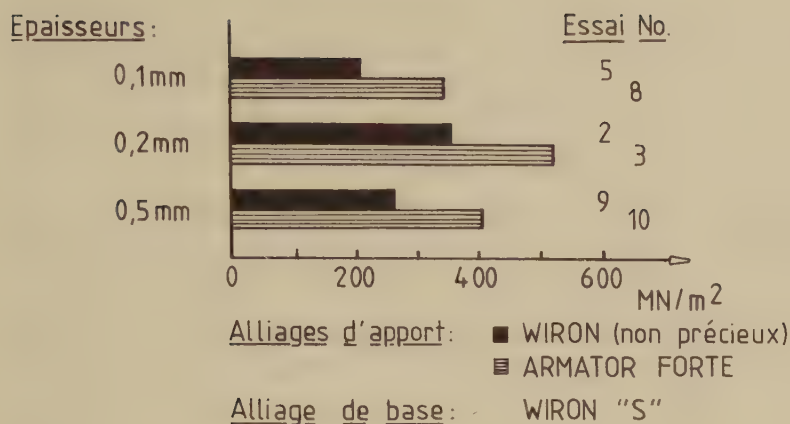


Figure 14 Comparaison des moyennes des charges de rupture, en ne faisant varier que l'épaisseur du joint.

Avec un écartement de 0,1 mm (essai No 5 et 8), la soudure ne peut pas couler facilement, peut-être à cause d'éventuels contacts entre les deux surfaces des pièces à rapporter, contacts dus à l'expansion thermique. Cela crée des lacunes dans le joint de soudure comme le montre la figure 15.

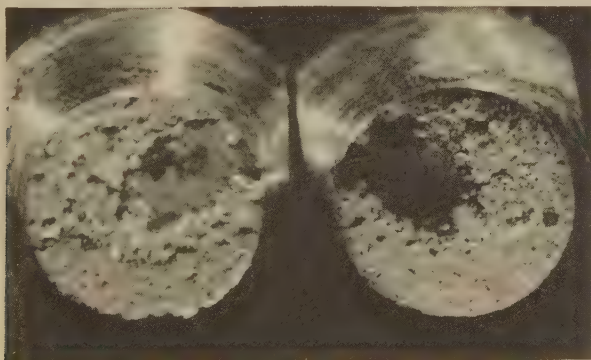


Figure 15 Photographie des surfaces de rupture d'un soudage à l'Armator Forte, avec un écartement de 0,1 mm. Au milieu d'une zone où la soudure s'est accrochée normalement, se trouve une tache de métal de base nu et seulement recouvert de quelques traces d'oxyde. Charge de rupture de 311 MN/m^2 , valeur la plus proche de la moyenne de 11 échantillons. (Alliage de base:Wiron S).

Les valeurs optimales, que l'on obtient avec une épaisseur de joint de 0,2 mm (Fig. 12), résultent de l'entrecroisement des cônes de forces résultantes complexes, apparaissant dans la masse de la soudure et partant de chaque interface métal de base - métal d'apport, comme le décrivent Lautenschlager et ses collaborateurs (Fig. 4).

Une épaisseur de joint de 0,5 mm est trop grande pour que soit possible un entrecroisement des régions coniques où se situent les forces résultantes complexes. Au moment de la rupture, sous l'effet des forces axiales en présence, il se produit un glissement des atomes du métal d'apport le long de plans atomiques privilégiés (plans octaédriques du système cristallin cubique à faces centrées), entraînant une fracture du type ductile. La charge de rupture est limitée à celle qu'aurait le même alliage, une fois fondu, coulé sans pression et refroidi. La figure 16 présente un exemple typique de la structure des surfaces de rupture d'un joint de ce type.

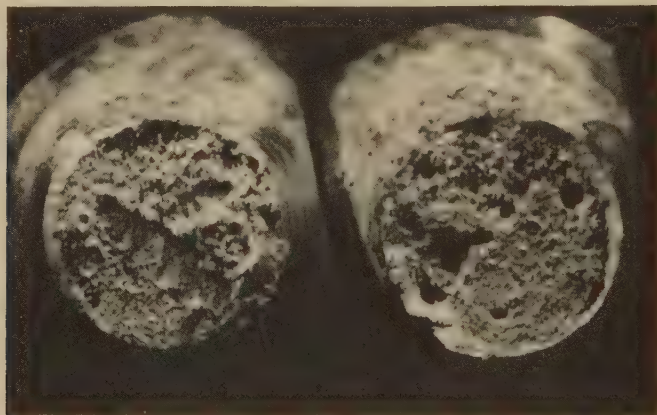


Figure 16 Photographie des surfaces de rupture d'un soudage à l'Armator Forte, avec un écartement de 0,5 mm. Le relief est profondément accidenté, ce qui indique une rupture du type ductile. Charge de rupture de $400,6 \text{ MN/m}^2$, valeur la plus proche de la moyenne de 11 échantillons (Alliage de base : Wiron S).

La différence entre la charge de rupture des soudages de 0,2 mm et de 0,5 mm d'épaisseur est plus grande lorsque l'alliage d'apport est précieux (Armator Forte : différence entre essais 3 et 10 : 132 MN/m^2) que lorsqu'il est non précieux (soudure Wiron : différence entre essais 2 et 9 : 89 MN/m^2). On peut concevoir que la plus grande ductilité de l'Armator Forte en est responsable, ce qui correspond à la théorie de Lautenschlager. Le renforcement est plus marqué lorsque la différence de ductilité est plus grande entre le métal de base et le métal d'apport.

Le renforcement d'un joint soudé par le choix de l'épaisseur de joint optimale est significatif statistiquement, comme l'indiquent les valeurs citées dans la Tableau 6.

5.3.* Influence de l'alliage

L'alliage de base influence-t-il la résistance du joint ?

Pour répondre à cette question, deux alliages nickel-chrome (Wiron S, essais 2 et 3 et Victory, essais 11 et 12) ont été testés dans les mêmes conditions, avec deux alliages d'apport différents (Armator Forte, Wiron) (Fig. 17). Les petites différences qui apparaissent entre les deux alliages de base ne sont pas significatives statistiquement, alors que les différences existant entre les alliages d'apport sont significatives, comme le démontrent les résultats de l'analyse de variance à deux facteurs (Tableau 7).

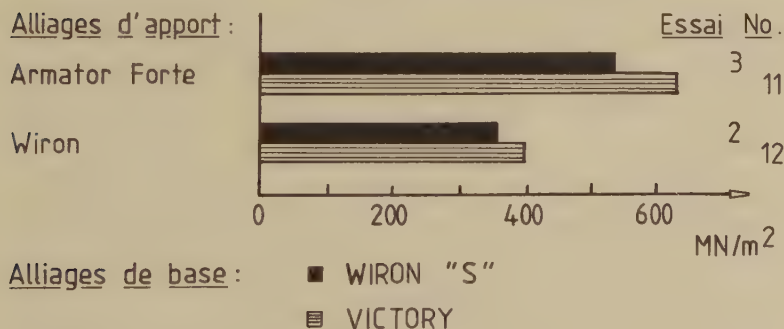


Figure 17 Comparaison de deux alliages à couler à base de nickel et de chrome, par répétition de deux tests de soudage.

Tableau 7 : Comparaison des alliages de base et des alliages d'apport.
Analyse de variance à deux facteurs.

Facteur A : Type de soudure	Facteur B : alliage de base		ANOVA
	Wiron S	Victory	Facteur A
Wiron	352	401	F = 15.47 ($F_{1,36}^{0.01} = 7.42$) ***
Armator Forte	527	622	
ANOVA Facteur B	F = 2.06 n.s.	ANOVA Interaction des facteurs A et B	F = 0.199 n.s.

*** Différences significatives entre les moyennes comparées
 (degré de protection de 0.01)

n.s. non significatif

5.4. Influence de la vitesse de chauffage

Les pièces à rapporter, après mise en revêtement et recouvrement de la zone de soudage avec du flux, sont tout d'abord préchauffées au four à 700° C. Intervient alors l'opération de soudage proprement dite, par fusion du métal d'apport.

Deux techniques de soudage ont été essayées, en maintenant constants tous les autres paramètres : même écartement de joint de 0,2 mm, même alliage de base (Wiron S), même alliage d'apport (Armator Forte), même flux (Wiron), même chalumeau (oxygène - gaz de ville).

La première technique, rapide, a consisté à mettre en place le paillon de soudure, puis à chauffer l'ensemble au chalumeau aussi vite que possible en gardant le chalumeau sur la zone de soudage (Essai 3).

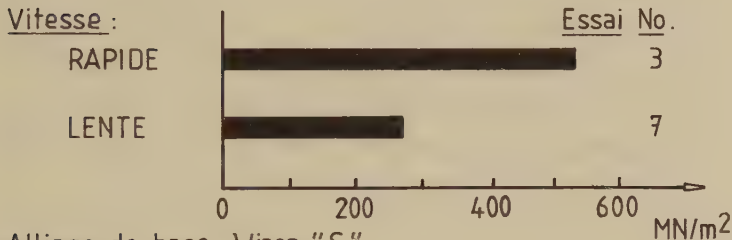
La seconde technique, lente, consiste à balayer les pièces à rapporter sur toute leur longueur avec le chalumeau, comme on le fait pour souder

les alliages d'or. Le paillon de soudure n'a été mis en place qu'au moment où les pièces se trouvaient à une température proche du liquidus du métal d'apport (Essai 7).

Les résultats montrent que la technique rapide est de loin préférable lorsque l'on soude des pièces de nickel-chrome (Fig. 18). La différence des moyennes est statistiquement très significative :

$t_{0.01} = 3.193$ (test de Student; la valeur limite à 1% pour un degré de liberté de 20 vaut 2.845).

Chauffée lentement, la surface de l'alliage nickel - chrome s'altère et l'éprouvette se rompt à l'un des interfaces alliage de base - alliage d'apport. La Figure 19 est particulièrement explicite à cette égard.



Alliage de base : Wiron "S"

Alliage d'apport : Armator Forte

Figure 18 Comparaison de l'efficacité des techniques de chauffage rapide et lente lors du soudage d'éléments en alliage nickel-chrome.

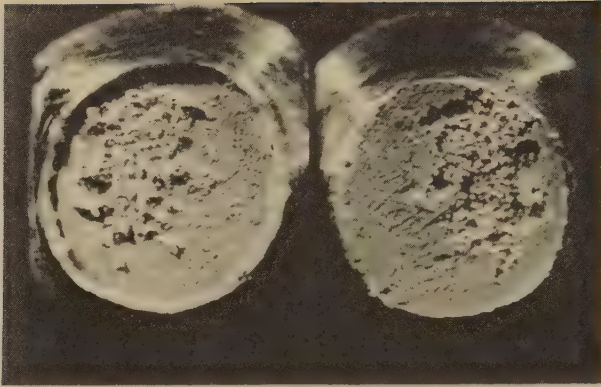


Figure 19 Photographie des surfaces de rupture d'une soudure à l'Armator Forte, en utilisant la technique lente. La rupture passe par un interface alliage de base - alliage d'apport et suit cet interface même dans les raies présentes à la surface de l'alliage de base. Seule exception : le centre de la pièce, où le trait de fracture passe à travers la masse de métal d'apport, car la soudure a accroché le métal de base. Cela explique la charge de rupture de 350 MN/m^2 , élevée pour un échantillon de cette série. (Alliage de base : Wiron S, écartement du joint: 0,2 mm).

5.5. Implications pratiques

Nous avons utilisé trois critères pour estimer si une soudure est suffisante ou pas pour une utilisation en prothèse dentaire conjointe :

- la charge de rupture
- la fiabilité de la technique
- l'aspect du joint.

La charge de rupture : En tenant compte des forces qui s'exercent dans l'appareil masticateur, toute soudure dont la charge de rupture atteint ou dépasse 100 MN/m^2 , offre la garantie qu'aucune rupture n'apparaîtra lors de l'utilisation si la surface du joint soudé est d'au moins 7 mm^2 . (Les forces maximum développées au niveau des molaires sont de l'ordre de 600 N, ce qui correspond à une contrainte de l'ordre de 85 N/mm^2 sur une surface de soudage de 7 mm^2 , soit une surface circulaire d'un diamètre de 3 mm, ou carrée de 2,65 mm de côté. La limite de 100 MN/m^2 , ou 100 N/mm^2 , est donc suffisante pour supporter les forces maximum développées en bouche. En raison du phénomène de

fatigue et des dégradations ultérieures toujours possibles, notamment par corrosion, il est cependant raisonnable de choisir une technique offrant des valeurs nettement plus élevées de la charge de rupture du joint .

La fiabilité de la technique : Comme il n'est pas possible de tester chaque soudure dentaire mécaniquement avant la mise en bouche des éléments prothétiques, il faut utiliser une technique de soudage fiable. Une technique qui permet d'obtenir sans exception la charge de rupture de 100 MN/m^2 , même si la moyenne des charges de rupture est basse, est suffisante et doit être préférée à des techniques où la moyenne est plus élevée , mais où le coefficient de variation est trop grand et où des valeurs individuelles peuvent ainsi se situer en-dessous de la limite de 100 MN/m^2 .

L'aspect du joint : Les joints soudés présentant des plages d'alliage de base non mouillées par l'alliage d'apport, recouvertes d'oxydes ou de traces de flux, sont plus facilement attaqués par la corrosion et, même si la charge de rupture de départ est suffisante, elle peut s'abaisser après un séjour des pièces rapportées en milieu buccal. En plus de ces problèmes mécaniques, des joints peu nets présentent des problèmes biologiques. Ils sont en effet de bons supports pour les microorganismes qui s'y accumulent en provoquant l'inflammation des tissus avoisinants. L'aspect des surfaces de rupture est facile à estimer à cet égard. Mais on peut souvent évaluer un joint déjà à son aspect extérieur par l'arrondi du métal d'apport contre le métal de base et par la présence d'éventuelles porosités.

Sur la base de ces critères, les conditions utilisées pour les essais 5, 7, 8, 14 et 15, conduisent à des résultats insuffisants pour une utilisation en prothèse dentaire conjointe. (Tableau 3 et 4).

Essai 5 : L'alliage d'apport Wiron, utilisé sous forme de joints soudés de 0,1 mm d'épaisseur, présente un coefficient de variation trop grand par rapport à la moyenne des charges de rupture.

Essai 7 : L'alliage d'apport Armator Forte utilisé avec la technique lente pour souder des alliages nickel - chrome est insuffisant à cause de l'aspect des soudages (fig. 19).

Essai 8 : Le même alliage Armator Forte, utilisé avec la technique rapide, mais avec un écartement de joint de 0,1 mm, est aussi insuffisant à cause de l'aspect des soudages (fig. 15).

Essai 14 : L'alliage Victory LF (basse fusion) est insuffisant mécaniquement lorsqu'il est chauffé au chalumeau butane - air et présente un coefficient de variation beaucoup trop grand comparé à la moyenne des charges de ruptures.

Essai 15: Le même alliage Victory LF, chauffé au four sous vide, serait juste suffisant mécaniquement. Mais il faut tenir compte de 5 échecs sur 11 tentatives d'obtenir un joint (échecs n'apparaissant pas dans la statistique) ainsi que de l'aspect des soudages (fig. 13).

6 . CONCLUSION

6.1. Le meilleur résultat : Une technique simple de soudage primaire.

Ce travail a montré que l'on peut joindre par soudage des pièces en nickel-chrome en utilisant une technique simple et avec des moyens que tout laboratoire peut se procurer. Il faut :

- 1e- Se limiter à des espaces entre les éléments de 0,2 mm. Au besoin, réduire un espace trop grand par une pièce intercalaire de métal de base, en obtenant deux espaces de 0,2 mm de largeur ou encore en réduisant l'espace par un placage des surfaces avec une soudure à haute fusion et soudage ensuite avec une soudure à base fusion (soudage secondaire) Une jauge d'épaisseur est facile à manier, bon marché et assez petite
▲ pour trouver sa place avec le matériel de soudage.
- 2e- Utiliser un flux de bonne qualité, contenant des fluorures, et en couvrir les pièces une fois solidarisées par le revêtement avant le préchauffage au four à 700^o C.
- 3e- Disposer un paillon de soudure précieuse à haute fusion au contact des deux pièces à rapporter, chauffer ensuite aussi vite que possible au moyen d'un chalumeau oxygène - gaz de ville. La température de fusion du métal d'apport doit être atteinte avant que le flux ne perde son pouvoir d'éliminer l'oxyde de chrome.
- 4e- Maintenir la flamme du chalumeau, réglée pour être réductrice, sur la zone de la soudure durant toute l'opération de soudage. On évite ainsi que les alliages ne s'oxydent au contact de l'air.

La figure 20 résume cette technique.

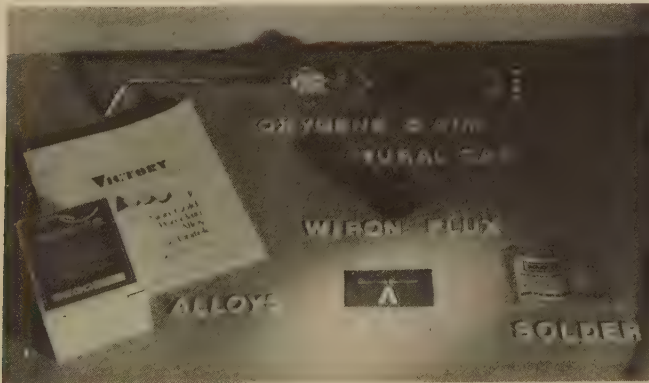


Figure 20 : Le matériel nécessaire, simple mais suffisant, pour obtenir de bons soudages des alliages nickel - chrome.

6.2 Soudage secondaire

Les deux alliages de base testés, ainsi que la plupart des alliages nickel - chrome à usage dentaire actuellement sur la marché, sont destinés à la coulée d'armatures d'éléments céramo-métalliques. La solidarisation d'éléments céramo-métalliques n'est souvent possible qu'après la cuisson de la porcelaine, par le soudage appelé secondaire, avec un alliage d'apport à basse fusion. L'essai 6 a montré que le soudage secondaire est tout à fait possible avec des armatures en nickel - chrome. Il suffit, avant de commencer la réalisation de la céramique, de revêtir les surfaces à souder d'alliage d'apport précieux à haute fusion et de souder, après la cuisson de la porcelaine, au moyen d'un alliage d'apport à basse fusion. Pour cette dernière étape, il faut utiliser un flux destiné aux alliages d'or (flux au borate).

L'essai ainsi réalisé avec les alliages Wiron S (alliage de base), Armator Forte (alliage d'apport à haute fusion) et UGDO No 2 (alliage d'apport à basse fusion) supporte parfaitement la comparaison avec les meilleures techniques à haute fusion, qui ne sont utilisables qu'avant la cuisson de la porcelaine (soudage primaire) (fig. 11, essai 13 et 3). Le soudage primaire de l'alliage Victory avec l'alliage d'apport à haute fusion Armator Forte (essai 13), donne certes le meilleur résultat absolu, mais la différence entre cet essai et le soudage secondaire (essai 6) n'est pas significative. Le soudage primaire de l'alliage Wiron S avec l'alliage d'apport Armator Forte (essai 3), donne une moyenne de charge de rupture de 534 MN/m^2 , contre 513 MN/m^2 pour le soudage secondaire. C'est une différence insignifiante et le coefficient de variation est même meilleur pour le soudage secondaire, avec 30,7% contre 40,4% pour le soudage primaire.

6.3. Avenir du soudage des alliages nickel-chrome pour l'usage dentaire

Si les résultats obtenus sont encourageants, les recherches sont toutefois loin d'être achevées.

Parmi les points restant à étudier, citons la corrosion galvanique et la corrosion chimique.

6.3.1. La corrosion galvanique

La salive étant conductrice de l'électricité, deux métaux différents se trouvant dans le milieu buccal forment une pile électrique.

On peut alors imaginer une corrosion galvanique entre l'alliage de base nickel - chrome et l'alliage d'apport précieux. Les valeurs électromotrices, très différentes pour l'or (+ 1,68 V) et pour le nickel (- 0,250 V) et le chrome (- 0,71 V), donnent une vague idée de l'importance de ce galvanisme. Le phénomène est en réalité rendu plus complexe par la passivation des alliages nickel - chrome et par le contact intime créée par le soudage entre les deux alliages.

6.3.2. La corrosion chimique

Tant les alliages d'or que les alliages nickel - chrome sont réputés résistants à cette corrosion. Il serait toutefois intéressant d'étudier les effets possibles d'un flux contenant des fluorures, dont des restes seraient en contact prolongé avec les deux alliages cités, en milieu humide.

Ainsi donc, cette étude, bien qu'elle ait permis de définir certains critères pour l'obtention de joints soudés satisfaisant entre des pièces coulées en alliages Ni-Cr, n'a pas résolu tous les problèmes. D'autres recherches restent nécessaires dans ce domaine.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) Anderson J.N.
Applied dental materials. 4e éd., Oxford, avril 1972
Blackwell Scientific Publications, chap. 15.
- 2) Anderson T.R., Fairhurst C.W., Ryge G.
Method for evaluation of dimensional changes in dental bridges
soldering. J.Dent.Res. 37, p. 96, 1958 (abstract).
- 3) Asgar K., Peyton F.A.
Casting dental alloys to embedded wires. (PGP wires).
J. Prosth. Dent., vol 15, (2), p. 312-321, 1965 .
- 4) Biem S.M., Ayers H.D. Jr.
Solder joints on plated rustless alloys.
J. Dent. Res., vol 37, (2), p. 368-372, 1958.
- 5) Brunschwiler P.
Mesures d'hygiène et de sécurité pour les travaux de soudage.
Office cantonal de l'inspection et des relations du travail,
Genève, 45 p., 1976 .
- 6) Castolin
Cours de métallurgie appliquée au soudage.
Edition Eurocentre Castolin Lausanne, 1966.
- 7) Castro R., De Cadenet J.-J.
Métallurgie du soudage des aciers inoxydables et résistants à
chaud. Dunod, Paris, 193 p., 1968.
- 8) Collett H.A.
Casting chrome-cobalt alloys in small laboratories.
J. Prosth. Dent., vol 21, (2), p. 216-226, 1969.
- 9) Draddy R.E.
Chrome-cobalt alloy pontics for fixed partial dentures.
J. Prosth. Dent., vol 25, (6), p. 638-641, 1971.
- 10) El Ebrashi M.K., Asgar K., Bigelow W.C.
Electron microscopy of gold soldered joints.
J. Dent. Res., vol 47, p. 5-11, 1968.
- 11) Eudier M.
Les alliages métalliques.
Que Sais-je No 173, Presses Universitaires de France,
127 p., 1965 .
- 12) Farrell J.
Dental materials. p. 59-62, Henry Kimpton publishers, London, 1971.

- 13) Fletcher M.J.
Welding metals together. Science Journal, p. 61, jan. 1971.
- 14) Gibson T.D., Asgar K., Peyton F.A.
The quality of union formed in casting gold to embedded attachment metals. J. Prosth. Dent., vol 15, (3), p. 464-473, 1965.
- 15) Harcourt H.J., Riddihough M., Osborne J.
The properties of nickel-chromium alloys containing boron and silicon. Brit. Dent. J., vol vol 129, (3), p. 419-423, 1970.
- 16) Jantzen J.
Prothetische Möglichkeiten durch eine neue Kobalt-Chrom-Titan Legierung. Dtsch. Zahnärztl. Z., vol 26, (3), p.394-397, 1971.
- 17) Johnson W.
Some mechanical properties of dental nickel-chromium alloys.
J. Dent. Res., vol 52, (5), abstract No 154, 1973.
- 18) Knieschwski F., Rau G.
Die theoretischen Grundlagen der Zahnprothetik. Tome I :
Werkstoffkunde : Metalle. p. 122-125, 132-133.
Verlag Neuer Merkur GMBH, München 22, 1967.
- 19) Kochavi J. (Star Dental Laboratories).
Method of making a casting having an oxidized surface layer, intended for use as a dental restoration. U.S. patent 3 716 418
(Int. Cl. C. 23 c 11/00), 5 p., feb. 13, 1973, appl.aug. 7, 1970.
- 20) Lautenschlager E.P., Marker B.C., Moore B.K., Wildes R.
Strength mechanisms of dental solder joints.
J. Dent. Res., vol 53, (6), p. 1361-1367, 1974.
- 21) Mohamed H., Asgar K.
A new dental superalloy system, parts I, IV.
J. Dent. Res., vol 52, (1), p. 136-156, (4), p. 744-749, 1974.
- 22) Nally J.-N.
Matériaux et alliages dentaires.
Julien Prélat Ed., Paris, 198 p., 1964 .
- 23) O'Brien W.J., Hirthe W.M., Ryge G.
Wetting characteristics of dental gold solders.
J. Dent. Res. 42, p. 675-680, 1963.
- 24) Perelmuter S., Gauzo F.
Soudure secondaire à haute fusion des éléments céramo-métalliques.
Rev. Française d'Odonto Stomatologie, vol 18, (2), p. 171-178, 1971.
- 25) Peyton F.A., Craig R.G.
Restorative dental materials, 4e éd., C.V. Mosby Company,
St. Louis, p. 301-313, 1971.

- 26) Riesgo O., Prilutzky H., Palacios T.
Unión de aleaciones preciosas y no preciosas con ataches para
porcelana. Apartado de la Revista de la Asociacion Odontologica
Argentina, volumen 61, marzo 1973.
- 27) Rouge F.
Etude dilatométrique des alliages non précieux et des revêtements
utilisés pour la prothèse conjointe. Thèse 339, Univ.de Genève, 1978.
- 28) Saragossi A.
Aperçu sur le brasage des alliages inoxydables. Thèse, accad. de
Paris, 1973.
- 29) Schwarz M.M.
Modern metal joining techniques.
Wiley Interscience, J. Wiley, New-York. P. 278-369, 1969.
- 30) Sécheron
Appareil Plasmafix 15 pour le soudage microplasma de pièce de 0,01
à 1 mm d'épaisseur. Prospectus S 511-01-6802 F.
- 31) Skinner E.W., Phillips R.W.
Science of dental materials, 7e éd., Saunders Company, chap.2,
33, 35, 38, 1973.
- 32) Stackhouse J.A.
Assembly of dental units by soldering
J. Prosth. Dent., vol 18, p. 131-139, 1967 .
- 33) Thouvenin A.
Les décors de rubans hachurés dans l'orfèvrerie mérovingienne.
Le laboratoire, notes techniques, Musée du Fer, Nancy, 4 p.
- 34) Thouvenin A.
La soudure dans la construction des oeuvres d'orfèvrerie antiques
et anciennes, Revue Archéologie de l'Est et du Centre Est, Tome
XXIV, fasc. 1.
- 35) Walters R.A.
A photographic evaluation of the solder joint between precious
and non precious metals. J. Prosth. Dent. 35, p. 689, 1976 .
- 36) Wirthner J.-M.
Résistance au ternissement de quelques alliages dentaires.
Thèse 322, Université de Genève, 1976 .

